

Belle II 実験 ARICH 検出器用モニターシステムの実装

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程2年

高エネルギー実験研究室

野口光太

平成29年1月10日

概 要

高エネルギー加速器研究機構では現在 Belle II 実験の準備を進めている。Belle II 実験は SuperKEKB 加速器によって電子・陽電子を加速、衝突させ B 中間子対を大量に生成するルミノシティフロンティア実験であり、1999 年から 2010 年まで行われ、小林・益川模型を証明した Belle 実験のアップグレードである。Belle 実験の 50 倍の統計量を集め、その崩壊過程から稀事象を観測することにより、新物理を探索することを目的とする。

Belle II 実験では新たに Belle II 測定器を製作し、B 中間子の崩壊を精密に測定する。Belle II 測定器は各役割を持つ複数の検出器から成る。その中で Endcap 部と呼ばれる領域では、Aerogel-RICH(Ring Imaging Cherenkov) 検出器が荷電 K/π の粒子識別の役割を担う。輻射体(シリカエアロゲル)を荷電粒子が通過した際に発生する Cherenkov 光を後段の光検出器 HAPD(Hybrid Avalanche Photo detector)で二次元的にリングイメージとして検出するものである。HAPD は光子が入射した時、光電面にて光電子を発生させる。それを印加電場で加速させることで $O(10^3)$ 程度の増幅を行う。加速された電子は APD に入射し、Avalanche 増幅により $O(10)$ 程度の増幅を行い、合計 $O(10^4)$ の増幅率で電荷が増幅される。さらに読み出し ASIC で増幅、波形整形および波高選別されて最終的にヒット情報として検出される。

ARICH では一台で 144ch を持つ HAPD を 420 台使用するため、チャンネルの合計数は 6 万以上になる。HAPD の動作は ARICH の性能に影響するため、全チャンネルの動作確認を行うモニターシステムが必要不可欠である。ARICH モニターシステムでは LED からのパルス光を光ファイバーによって ARICH 内部に照射してシリカエアロゲルで反射させ、その光を HAPD が正常に検出することを確認することによって定期的に HAPD の動作確認を行う。Belle II 実験開始時期には組み上げたシステムの健全性の確認、安定期には故障チャンネル情報及び各チャンネルの出力変化時のキャリブレーションのために使用する。

本研究では ARICH 検出器のモニターシステムの実装、各構成要素の調整、動作試験を行った。モニターシステムによる LED 光はチェレンコフ光に代わる光源となるため、モニターシステムの動作試験であると同時に ARICH 検出器の動作試験となる。本論文ではモニターシステムの実装と、試験運用について報告する。

目次

第 1 章	序論	3
1.1	B 中間子の物理	4
1.1.1	CP 対称性の破れ	4
1.1.2	$B^0 - \bar{B}^0$ 混合	6
1.2	Belle 実験	6
1.3	本研究の目的	8
1.3.1	Belle II 実験で期待される新物理	8
1.3.2	ARICH モニターシステムの役割	9
第 2 章	Belle II 実験	11
2.1	SuperKEKB 加速器	11
2.2	Belle II 測定器	14
2.2.1	PXD、SVD (Pixel Detector、Silicon Vertex Detector)	16
2.2.2	CDC (Central Drift Chamber)	18
2.2.3	TOP (Time of Propagation)	20
2.2.4	ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov)	22
2.2.5	ECL (Electromagnetic Calorimeter)	22
2.2.6	KLM (K_L^0 and muon)	23
2.2.7	データ収集システム	24
第 3 章	ARICH 検出器	25
3.1	ARICH 検出器に要求される性能	25
3.2	粒子識別原理	25
3.3	ARICH 検出器の構造と構成要素	26
3.3.1	輻射体シリカエアロゲル	28
3.3.2	光検出器 HAPD	30
3.3.3	信号読み出しシステム	34

第 4 章	ARICH モニターシステム	40
4.1	モニターシステムの概要	40
4.1.1	モニター方法	40
4.1.2	モニターシステムの構成要素	42
4.2	モニターシステムの開発	50
4.2.1	構成要素の性能評価	50
4.2.2	モニターシステムの原理検証	52
4.2.3	長期安定性測定	53
4.3	試験運用 (2016 年 8 月 2017 年 2 月)	57
4.3.1	セットアップ	57
4.3.2	LED 光源発光量とヒット率の相関	59
4.3.3	LED 光源点灯時間とヒット率の相関	62
4.3.4	LED 光源点灯時間と光量距離減衰の相関	63
第 5 章	ARICH モニターシステムの実装	66
5.1	実装される構成要素の評価	66
5.1.1	LED 光源の性能個体差	66
5.1.2	ライトパルサーモジュールの性能個体差	70
5.2	光ファイバーバンドルのインストール	72
5.3	延長用光ファイバーのインストール	74
5.4	実装後試験のセットアップ	75
5.4.1	閾値電圧値の決定	77
5.4.2	データ取得タイミングの調整	77
5.4.3	LED 光源点灯時のスレッシュホルドスキンの結果	78
5.4.4	ヒット率分布	79
5.5	HAPD 増幅率の算出	80
5.6	その他の構成要素の実装	82
第 6 章	Belle II 実験と ARICH 検出器の現状	85
第 7 章	結論	87

第1章 序論

茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK)(図 1.1) で 1999 年から 2010 年まで、「Belle 実験」が行われた。これは電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器「KEKB 加速器」によって大量の B 中間子対を生成し、その崩壊事象を観測する実験である。これにより CP 対称性の破れを検証し、小林・益川模型を証明した。また、標準理論を超えた新物理の兆候も見られるなど、数多くの成果を挙げた。この章では B 中間子の物理と Belle 実験の功績、Belle II 実験の目指す新物理について述べる。



図 1.1: 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK)。

1.1 B 中間子の物理

1.1.1 CP 対称性の破れ

1964 年に J. W. Cronin, V. L. Fitch らによって中性 K 中間子系における CP 対称性の破れが世界で初めて観測された。彼らは実験により、CP 対称性のため起きないと考えられていた中性 K 中間子の CP 固有状態の一つ K_L から CP even である 2 つの π 中間子への稀な崩壊を観測した [4]。

CP 対称性の破れを説明するためのモデルの一つとして 1973 年に小林誠と益川敏英によって提唱されたのが小林・益川模型である [5]。この理論は u,d,s のクォークを標準模型で説明していた Cabibbo 混合を三代に拡張したものである。これにより弱い相互作用の固有状態と質量固有状態との変換行列 (CKM 行列) の行列要素に複素位相が存在する。

CKM 行列は以下のように書き表される。

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

行列の各成分が各世代における弱い相互作用固有状態と質量固有状態との混合の大きさ (クォーク世代間の混合の大きさ) を表す。また、混合角 $\theta_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ と複素位相 δ を用いて次のように表現することがある。

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{23}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

ただしここで s_{ij}, c_{ij} は以下の意味である。

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij} \quad (1.3)$$

δ が CP を破る複素位相であるため、CP を破る振幅は $e^{i\delta}$ の虚数成分である $\sin \delta$ に比例することがわかる。さらにこれを

$$\lambda = s_{12}, A\lambda^2 = s_{23}, A\lambda^3(\rho - i\eta) = s_{13}e^{-i\delta} \quad (1.4)$$

のようにパラメータを書き換えることで

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

と表すことができ、これを Wolfenstein 表示と呼ぶ [8]。ただし $\lambda \ll 1$ であり、 $\mathcal{O}(\lambda^4)$ の項は無視している。なお λ は実験から 0.22 程度と決定されている。

CKM 行列はユニタリー行列であるため、b クォークを含む項に関して以下のような恒等式が成り立つ。

$$V_{td}V_{tb}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{ud}V_{ub}^* = 0 \quad (1.6)$$

左辺のそれぞれの項は Wolfenstein パラメータ (ρ, η) による複素平面上的ベクトルとして表現できる。よって式 1.6 は閉じた三角形 (ユニタリー三角形) として描くことができる。底辺の長さを 1 とするような規格化を行うことで $(\bar{\rho}, \bar{\eta}) = (1 - \lambda^2/2)(\rho, \eta)$ 複素平面に三角形を描いた図を (図 1.2) に示す。この時、 ϕ_2 の座標は $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ となる。

実験で測定されたベクトルを描いた際にこのユニタリー三角形が閉じていれば小林・益川模型が正しいと言え、標準理論で CP 対称性の破れが説明できる。

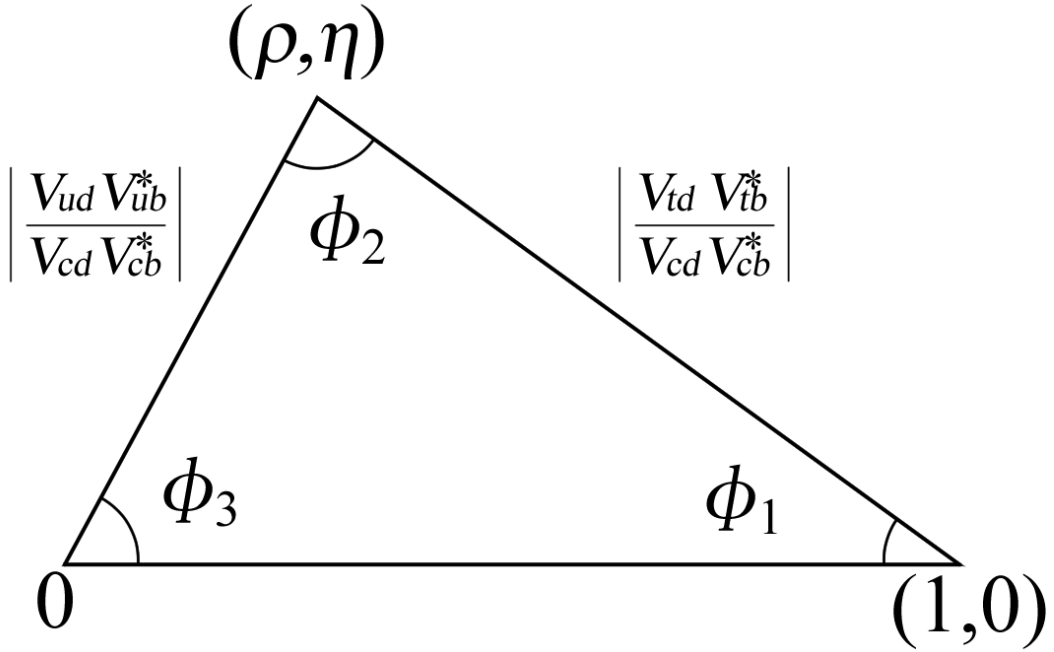


図 1.2: $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ 複素平面に描いたユニタリー三角形。

1.1.2 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合

B^0 中間子は $|B^0\rangle$ と $|\bar{B}^0\rangle$ の量子力学的な重ね合わせとして存在し、

$$|B^0(t)\rangle = a(t)|B^0\rangle + b(t)|\bar{B}^0\rangle \quad (1.7)$$

のように表すことができる。 $|B^0(t)\rangle$ の時間発展はシュレディンガー方程式を用いて

$$i\frac{d}{dt}|B^0(t)\rangle = (M - i\frac{\Gamma}{2})|B^0(t)\rangle \quad (1.8)$$

と書け、 $|\bar{B}^0\rangle$ も同様である。 M と Γ は質量行列と崩壊行列と呼ばれる 2×2 のエルミート行列である。これらの行列のため B^0, \bar{B}^0 は以下のような干渉状態を形成する。

$$B_1 = p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle \quad (1.9)$$

$$B_2 = p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle \quad (1.10)$$

この式で表されるように、 B^0 及び \bar{B}^0 は、始状態 ($t=0$) で B^0 あるいは \bar{B}^0 であった状態からお互いへの遷移が理論的に許されており、 B^0 から \bar{B}^0 へも同じ CP 固有状態 f_{CP} に崩壊することができる。このような B^0 と \bar{B}^0 の量子力学的重ね合わせを $B^0 - \bar{B}^0$ 混合と呼ぶ。

同じ終状態 f_{CP} に崩壊する場合でも B^0 と \bar{B}^0 の満たすシュレディンガー方程式は異なるため、 f_{CP} への崩壊時間に差が生じると考えられる。始状態が B^0 であったか \bar{B}^0 であったかを同定することができればその崩壊時間分布を比較して B^0 と \bar{B}^0 の CP 非対称性を検証することができる。

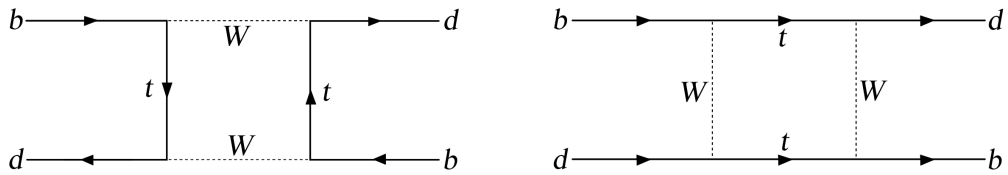


図 1.3: $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例。このような過程を Box diagram と呼ぶ。

1.2 Belle 実験

Belle 実験は先に述べた通り大量の B 中間子を生成する実験であり、このような実験は B-factory と呼ばれる。

CKM 行列の要素の中で b クォークに関する行列要素である V_{tb} が大きくなることが予想されていた。 b クォークは質量が大きい³が、 b クォークを含む粒子の中で最も質量が小さく生成が比較的容易な B 中間子対に注目したのが B-factory 実験である。

B 中間子対を生成するためには電子・陽電子の対消滅によって生成される、 b クォークと半 b クォークの共鳴状態である $\Upsilon(4S) = (b\bar{b})$ から $B^0 - \bar{B}^0$ への崩壊を利用する。 $\Upsilon(4S)$ の質量は $m \simeq 10.58 \text{ GeV}/c^2$ であるため、重心系衝突エネルギーがこの値になるように加速器を調整する。

B^0 と \bar{B}^0 の崩壊時間差はピコ秒オーダーであるが³、現在の技術による検出器ではこの時間分解能は成し得ない。そのため B-factory 実験では電子・陽電子の衝突を非対称エネルギーで行い、生成される粒子の寿命を Lorentz boost によって延ばし、更に崩壊時間差を崩壊位置差から見積もることで観測を可能にした。Belle 実験では電子エネルギーを $8 \text{ GeV}/c$ 、陽電子エネルギーを $3.5 \text{ GeV}/c$ とすることで、衝突後の B 中間子対に $4.5 \text{ GeV}/c$ 程度の運動量を与え、崩壊までの飛距離は $200 \mu\text{m}$ 程度となった。

また、1.1.2 小節で述べた通り始状態で B^0 と \bar{B}^0 、どちらであっても Belle 実験で注目する CP 固有状態である終状態 $J/\psi K_S$ に崩壊することができる。このため、始状態が B^0 と \bar{B}^0 であったかを同定するため、片方が $J/\psi K_S$ に崩壊した (これを CP side と呼ぶ) 時、もう片方が完全に同定可能な崩壊モード (これを tag side と呼ぶ) である場合に CP side の始状態を同定するという手法をとる。

Belle 実験によって観測された、 B^0 と \bar{B}^0 の崩壊時間ごとの観測頻度のプロットを (図 1.4) に示す。青色のプロットが $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ 、赤色のプロットが $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^0$ と同定された事象のものである。

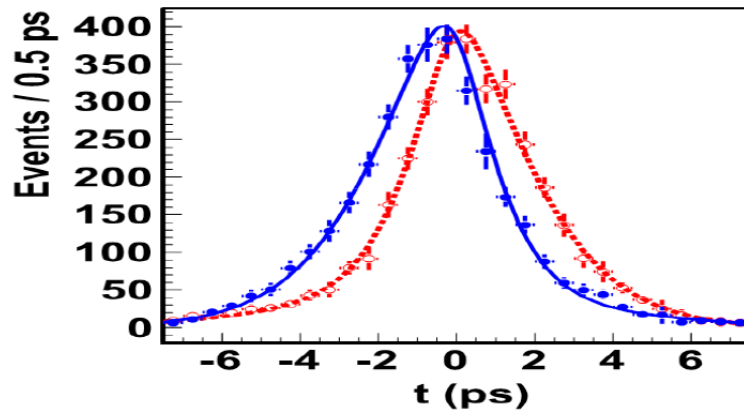


図 1.4: Belle 実験によって観測された、 B^0 と \bar{B}^0 の崩壊時間ごとの観測頻度のプロット。

B-factory 実験は 1999 年開始の Belle 実験の他、同年にほぼ同様の原理、構造でスタンフォー

ド線形加速器センター (SLAC) の PEP-II 加速器による BaBar 実験が行われた。BaBar 実験は 2008 年、Belle 実験は 2010 年に運転停止、実験を終了した。

1.3 本研究の目的

1.3.1 Belle II 実験で期待される新物理

Belle 実験では、B 中間子系で CP 対称性の破れを観測し、小林・益川模型を証明した。しかし Belle 実験では統計量により測定精度が制限され、標準模型を超える物理事象を観測することはできなかった。

Belle II 実験では、Belle 実験以上の統計量を得ることで精密測定を行い、標準理論を超えた新物理を探索する。以下に Belle II 実験で観測が期待される新物理事象を紹介する。

CKM 行列の精密測定

小林・益川理論で扱われる Unitarity Triangle の各角度と辺の更なる精密測定を行う。角度に関する観測モードは tree diagram が支配的で loop を含まないため、新物理の関与が少なく標準模型の範囲内で精密測定が可能である。

超対称性理論の検証

現在観測されている、クォークやレプトンといった物質粒子は半整数のスピン、ゲージボソンやヒッグス粒子は整数のスピンをもつ。これらに対して、整数スピンをもったスクォークやスレプトン、半整数スピンをもったゲージフェルミオン、ヒッグシーノといった粒子が预言されており、このスピン対称性を超対称性という。

標準模型の範囲内では $b \rightarrow s\gamma$ 遷移は tree diagram で禁止されているため、崩壊中に loop を介して観測される。例としては penguin diagram によって引き起こされる Flavor Changing Neutral Current(FCNC) がある (図 1.5)。標準理論に含まれる W の代わりに荷電ヒッグス粒子や超対称性粒子が含まれれば $b \rightarrow s\gamma$ 遷移を含む崩壊分岐比に標準理論とのずれが生じる。

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移は $B \rightarrow X_{S\gamma}$ 崩壊 (X_S はストレンジを 1 つ含む終状態の総称) の中に表れ、 X_S の終状態には多数の K/π 粒子が含まれる。このため、これらの崩壊モードの精密測定には高い K/π 粒子識別が求められる。

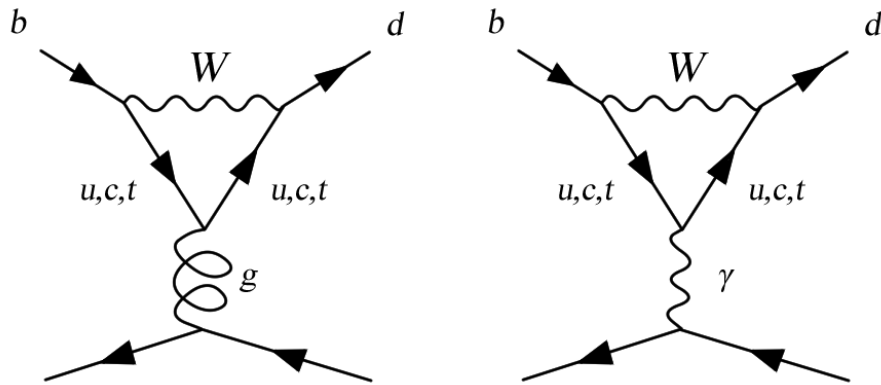


図 1.5: penguin diagram の例。

荷電ヒッグス粒子探索

標準理論では $B \rightarrow \tau\nu$ や $B \rightarrow D\tau\nu$ といった崩壊は (図 1.6) に示すような diagram で、 W^\pm の交換により起きる。しかし W^\pm の代わりに荷電ヒッグス粒子が交換されることで崩壊分岐比に標準理論とのずれが生じる。

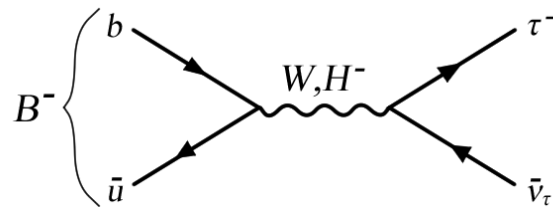


図 1.6: $B \rightarrow \tau\nu$ の例。標準理論では W の交換により起きるが、荷電ヒッグス粒子の交換によって起きることが期待されている。

Belle 実験と Babar 実験で測定された崩壊分岐比の世界平均は、標準模型の予想値よりも 1.6σ ほどずれている。Belle II 実験ではより高い精度で測定を行うことで新物理の発見を目指す。

1.3.2 ARICH モニターシステムの役割

Belle II 実験では Belle 実験以上の高い精度で B 中間子対の崩壊過程を観測する。このためには高い K/π 粒子識別が求められる。このため Belle 測定器 ACC 検出器のアップグレードと

して、Belle II 測定器のエンドキャップ部 (後述) で荷電 K/π 粒子の識別を行う検出器である Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) を開発中である。

ARICH では荷電粒子により輻射体内で発生するチェレンコフ光を光検出器で二次元リングイメージとして検出し、このリングイメージの半径から荷電 K/π 粒子の識別を行う。

光検出器は単一光子検出が可能であることが求められる。また、位置分解能の要求からそのチャンネル数は6万を超える。ARICH 検出器は SuperKEKB 加速器運転中に放射線に曝され、光検出器の損傷、性能劣化が予想されている。

ARICH モニターシステムでは LED 光を用いて光検出器の動作確認を行う。本研究では開発された ARICH モニターシステムを ARICH 構造体の実装し、光検出器の動作確認の可否を検証した。2 章では ARICH が使用される Belle II 実験について解説する。3 章では ARICH の動作原理、構成要素について詳しく述べる。4 章では開発された ARICH モニターシステムの概要と、先行研究による原理検証を簡単に記述する。5 章では ARICH モニターシステムの実装と動作試験について報告し、6 章で本研究の結論を述べる。

第2章 Belle II実験

この章では Belle II 実験による観測が期待される標準模型を超えた新物理と、Belle II 実験に向けて建設されている SuperKEKB 加速器、Belle II 測定器とそれを構成する各検出器について解説する。

2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は、Belle 実験で使用された KEKB 加速器をアップグレードしたもので、KEKB 加速器同様の電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である。

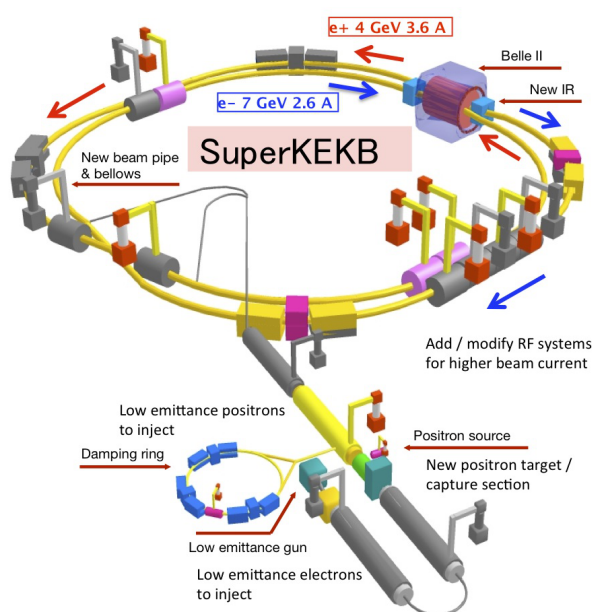


図 2.1: SuperKEKB 加速器の概要図

加速器の性能を表す指標として「衝突エネルギー」と「ルミノシティ(Luminosity: \mathcal{L})」が挙げられる。ルミノシティとはビーム衝突点における粒子の単位面積、単位時間あたりの衝突頻

度を示す量であり以下の式で定義される。

$$R = \mathcal{L}\sigma \quad (2.1)$$

ここで $R[\text{s}^{-1}]$ は対象となる事象の単位時間当たりの発生頻度、 $\sigma[\text{cm}^2]$ は反応断面積であり、ルミノシティは $[\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$ という次元になる。

加速器実験は高い衝突エネルギーにより重い粒子を生成する「エネルギーフロンティア実験」と、高いルミノシティによって統計量を増やして稀崩壊事象を観測する「ルミノシティフロンティア実験」という大きく分けて2種類のアプローチがある。(図 2.2) に主要な加速器の衝突エネルギーとルミノシティを示す。Belle 実験、Belle II 実験はルミノシティフロンティア実験である。Belle II 実験では Belle 実験の 40 倍のルミノシティを目指してアップグレードを行う。

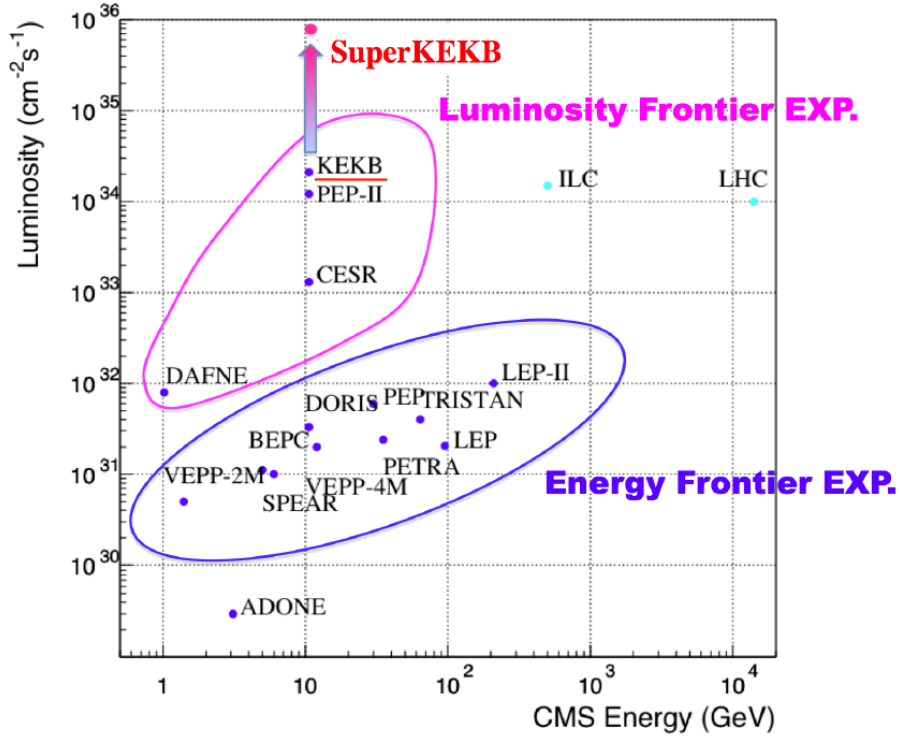


図 2.2: 主要な加速器の一覧。横軸は衝突エネルギー、縦軸はルミノシティを表す。加速器実験はエネルギーフロンティア実験とルミノシティフロンティア実験に分類できる。

ビームに関するパラメータを用いるとルミノシティは以下の式のように表すことができる。

$$\mathcal{L} \approx \frac{\gamma_{\pm}}{2qr_e} \left(\frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right) \quad (2.2)$$

$\gamma_{e\pm}$ は Lorentz 因子。 q は素電荷量。 r_e は古典電子半径。 $I_{e\pm}$ はビーム電流。 $\xi_{y\pm}$ は衝突点で

ビーム同士が互いに及ぼし合う力の大きさを示す、Beam-beam parameter と呼ばれる量。 $\beta_{y\pm}^*$ は y 方向衝突点 β 関数と呼ばれ、ビームサイズを決める絞り込みの大きさに対応する量で、基準軌道からの粒子の垂直方向のずれの大きさに関係する。また、添え字の \pm は電子・陽電子の積であることを示し、*は衝突点での値であるという意味を示す。

式 2.2 から、ルミノシティを向上させるにはビーム電流 $I_{e\pm}$ を大きくするか、 $\beta_{y\pm}^*$ を小さくすればよいことがわかる。 SuperKEKB では KEKB に比べビーム電流 $I_{e\pm}$ を 2 倍にする。更にビームサイズを小さく絞る「Nano-Beam 方式」を採用し、 $\beta_{y\pm}^*$ を 1/20 にする。ビームサイズを絞るにあたり、通常は砂時計効果による制限によりビームのバンチ長程度より小さく絞ってもルミノシティが向上しない。 SuperKEKB ではビームの交差角度を大きくすることで実質的なバンチ長を短くし、解決している (図 2.3)。これらにより SuperKEKB は KEKB の 40 倍のルミノシティを実現する。

しかしビームサイズを小さく絞ることで電子同士・陽電子同士のクーロン散乱の影響が大きくなる。これを Touchek 効果と呼ぶ。 Touchek 効果は電子と比べ陽電子で影響が大きく、またビームのエネルギーが小さいと影響が大きくなる。そのため、KEKB では陽電子ビームのエネルギーが 3.5GeV/c だったところを、 SuperKEKB では 4GeV/c に増強する。衝突エネルギーは $\Upsilon(4S)$ の生成エネルギーから変更しないため、KEKB では電子ビームのエネルギーが 8GeV/c だったところを、 SuperKEKB では 7GeV/c に変更することで調節する。

KEKB と SuperKEKB の主なパラメータの比較を表 2.1 にまとめる。

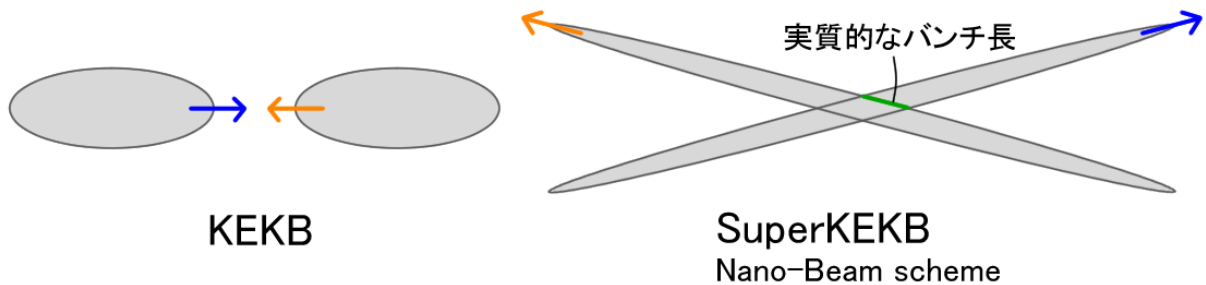


図 2.3: Nano-Beam 方式の概念図。ビームの交差角度を大きくすることで実質的なバンチ長を短くし、砂時計効果を解決している。

表 2.1: KEKB と SuperKEKB の主なパラメータの比較

パラメータ	KEKB		SuperKEKB	
	LER	HER	LER	HER
エネルギー [GeV/c]	3.5	8.0	4.0	7.0
ξ_y	0.129	0.090	0.090	0.088
$\beta_{y\pm}^*$ [mm]	5.9	5.9	0.27	0.41
I[A]	1.64	1.19	3.60	2.62
\mathcal{L} [$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	2.11		80	

2.2 Belle II 測定器

Belle II 測定器は 7 つの検出器で構成される。Belle II 測定器の完成イメージと各検出器の設置位置を (図 2.4) に示す。7 つの検出器はそれぞれ異なった情報を観測し、それらを統合することで衝突後の現象を調べることができる。7 つの検出器の特徴を簡単に述べる。

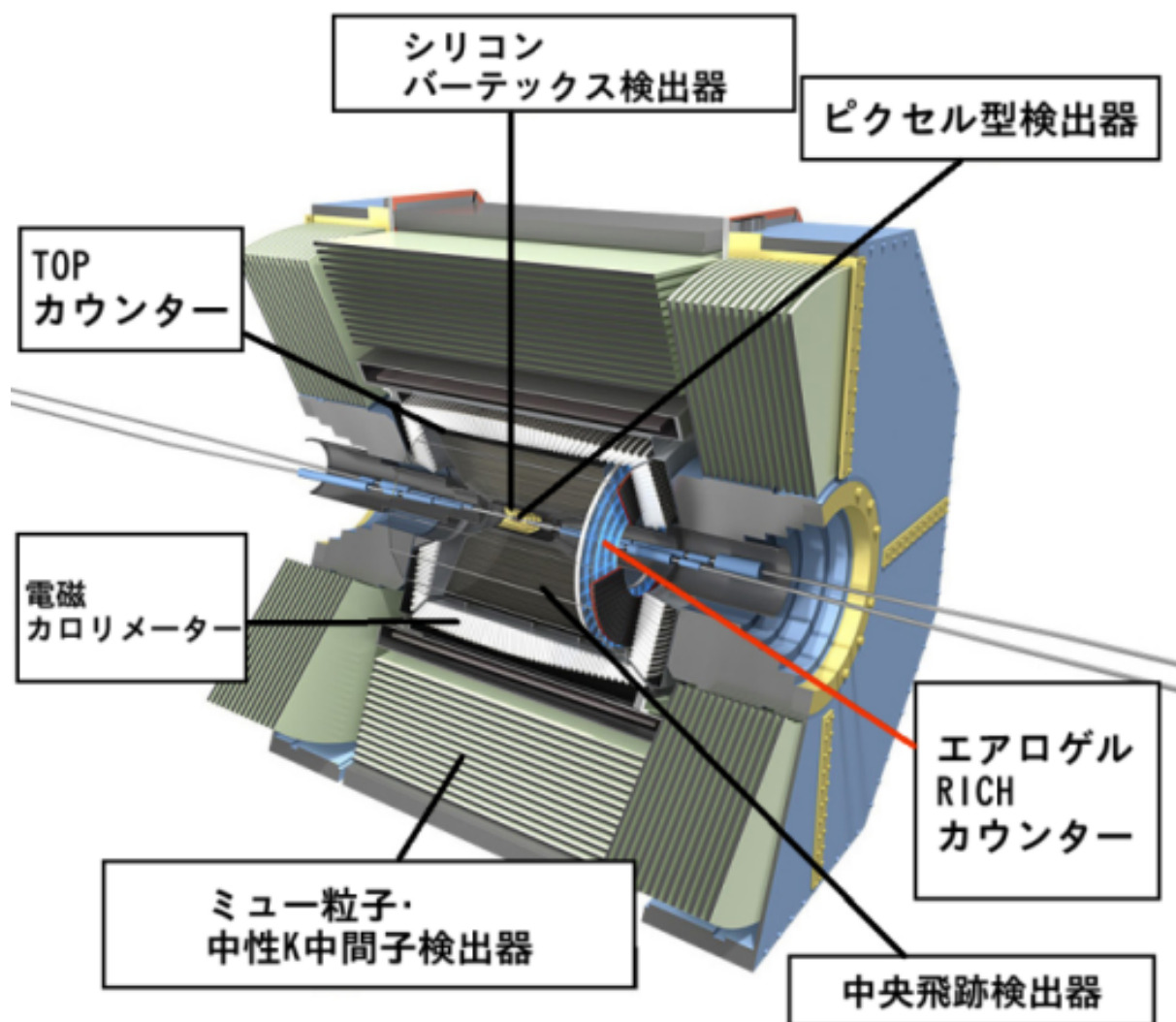


図 2.4: Belle II 測定器の完成イメージと各検出器の設置位置。

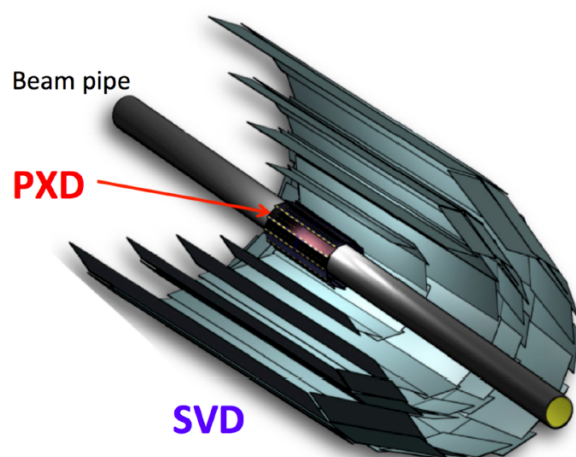


図 2.6: PXD、SVD の完成イメージ図。

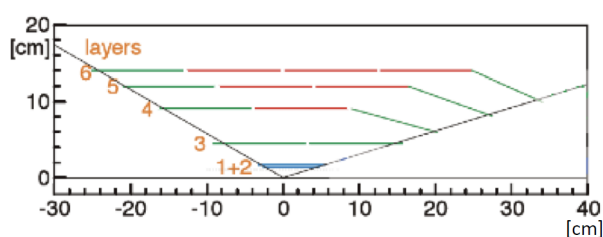
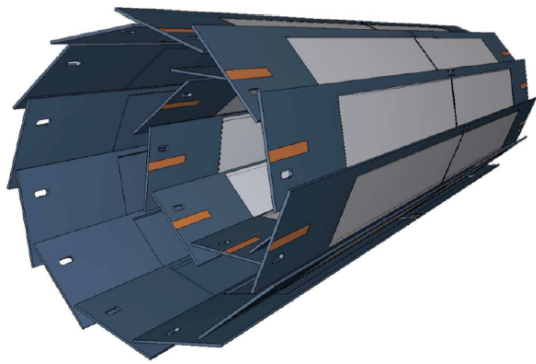


図 2.7: PXD、SVD の配置図。

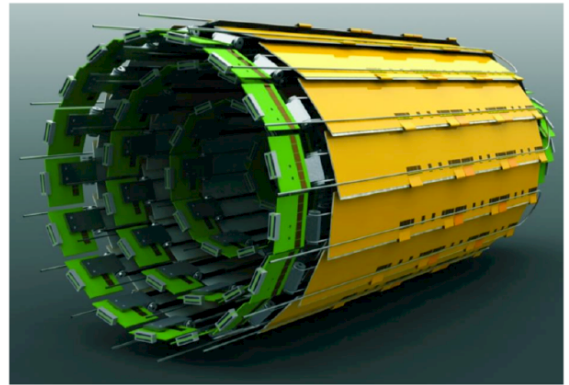
(図 2.8) に PXD と SVD それぞれの完成イメージ図を示す。荷電粒子がシリコンを通過する時に発生する電子を電気信号として読み取ることで荷電粒子の飛跡を数十 μm の精度で検出する。これを元に親粒子 (B 中間子、反 B 中間子) の崩壊点を求める仕組みである。PXD、SVD は層状の検出器になっており、Belle 実験では SVD の 4 層のみだったが、Belle II 実験では PXD の 2 層を追加することで崩壊点検出性能を向上させる。

PXD は DEPFET (DEpleted P-channel Field Effect Transistor) と呼ばれるピクセル化されたシリコン検出器で構成される。シリコン空乏層に荷電粒子が入射すると電子・正孔対が生成され、増幅されて読み出される。

SVD は DSSD (Double sided Silicon Strip Detector) と呼ばれるシリコン検出器が各層の両面に直行するように設置されることで二次元位置情報の検出を行う。(図 2.9) に DEPFET と DSSD の構造図を示す。

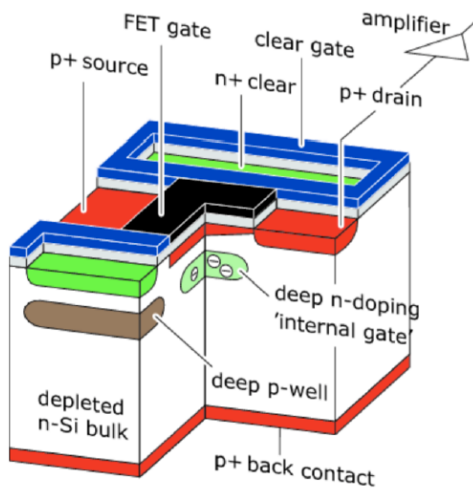


PXD

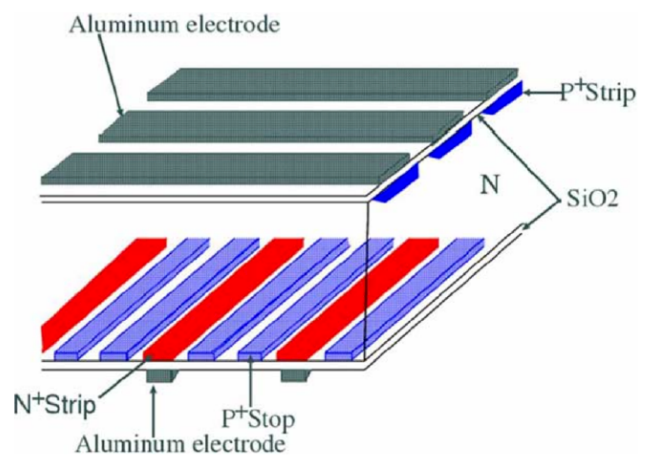


SVD

図 2.8: 左図が PXD、右図が SVD の完成イメージ図。



DEPFET



DSSD

図 2.9: DEPFET と DSSD の構造図。

2.2.2 CDC (Central Drift Chamber)

CDC は荷電粒子の運動量を測定する検出器である。また、 $1\text{GeV}/c$ 以下の運動量領域での粒子識別を行う。ビーム軸方向にかけられた 1.5T の磁場により、荷電粒子は湾曲した飛跡を描く。磁場 $B[\text{T}]$ 、曲率半径 $\rho[\text{m}]$ から以下の式を用いて運動量 p を求める。

$$p[\text{GeV}/c] = 0.3\rho[\text{m}]B[\text{T}] \quad (2.3)$$

CDC の内部には多数のワイヤーが張られている。これらを陽極、陰極として間に 2.3kV の高電圧がかかっている。荷電粒子が通過する際、充填されたガスをイオン化することによって電子が発生する。この電子は電場中をドリフトし、陽極で電気信号として検出される。この信号から、荷電粒子が通過した位置 (飛跡) と、そこに落としたエネルギー dE/dx がわかる。(図 2.10) に各荷電粒子の運動量と CDC 内で失うエネルギー dE/dx の関係を示す。この図から、落としたエネルギーと運動量を用いて、1GeV/c 以下の運動量領域で電子、陽子、K 中間子、 π 中間子を識別可能であることがわかる。

また、ワイヤー配置を表す CDC の断面図を (図 2.11) に示す。Belle 実験時と比べ、Belle II 実験では中心部のセルサイズを小型化することで位置分解能を向上させる。

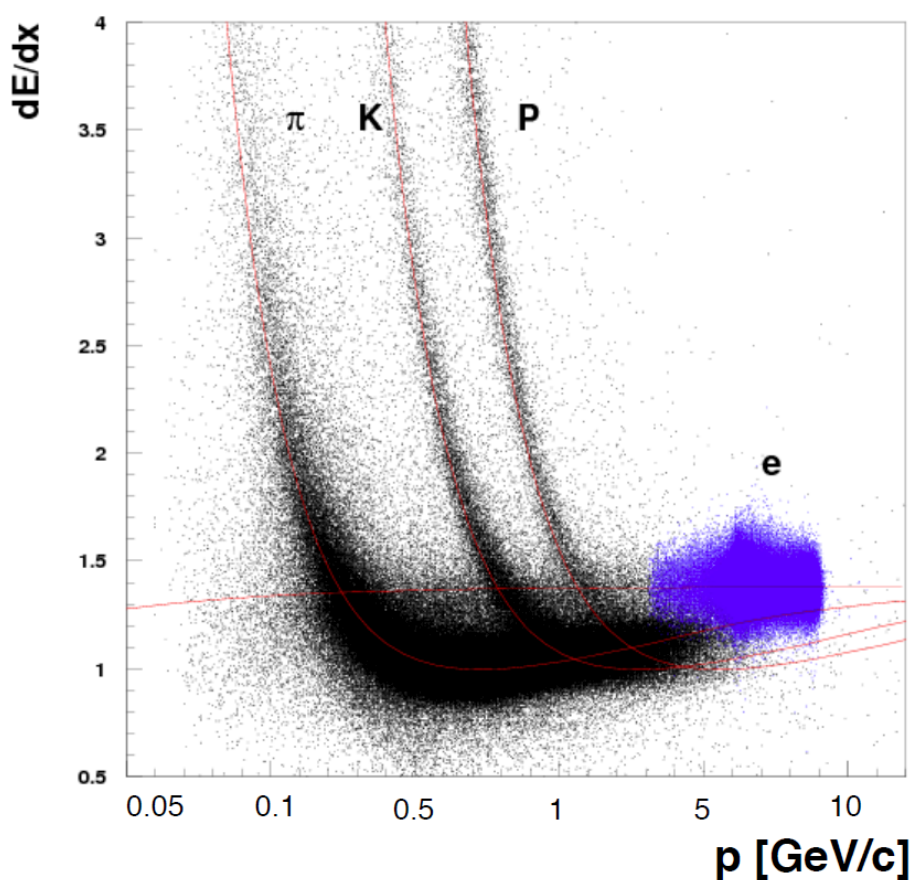


図 2.10: 各荷電粒子の運動量と CDC 内で失うエネルギー dE/dx の関係。

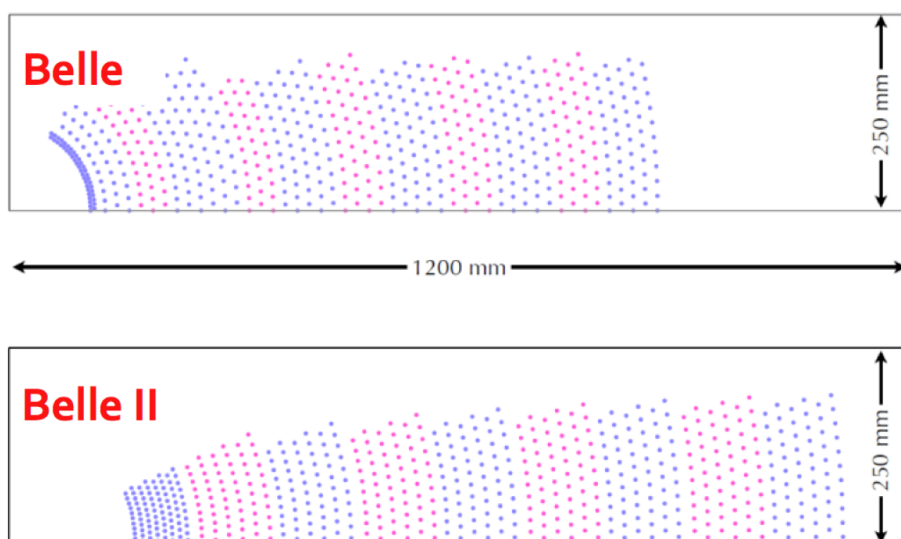


図 2.11: CDC の断面図の比較。

2.2.3 TOP (Time of Propagation)

TOP は Belle II 測定器の中のビーム軸の同心円に沿った円筒状の領域「Barrel 部」で粒子識別を行う検出器である。TOP モジュールの概要図を (図 2.12) に、粒子識別原理図を (図 2.13) に示す。輻射体として石英ガラス (屈折率 ~ 1.47) を使用し、荷電粒子が通過する際に発生する Cherenkov 光を観測する。発生した Cherenkov 光はクォーツ内を全反射して進み、端部で半円形に投影される。荷電粒子の種類 (質量) によって Cherenkov 光の放射角 θ_c が異なる。 θ_c の差は光検出器で検出するリングイメージの半径差として表れるため、 K_{\pm} と π_{\pm} の粒子識別を行うことができる。クォーツと光検出器の間にはライトガイドを設置し、リングイメージを拡大することで位置分解能を向上させる。また、クォーツ内での光路差が異なることから検出時間に差が出る。これを利用する TOF (Time-of-Flight) 測定を行うことで粒子識別性能を向上させている。

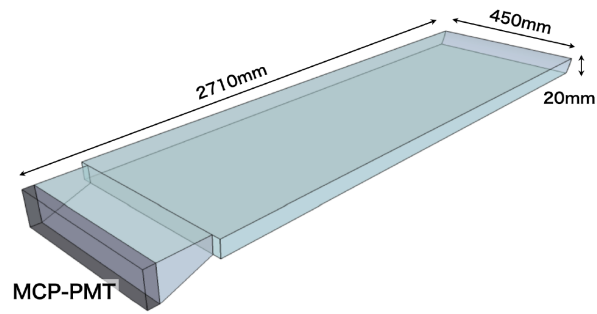


図 2.12: TOP モジュールの概要図。

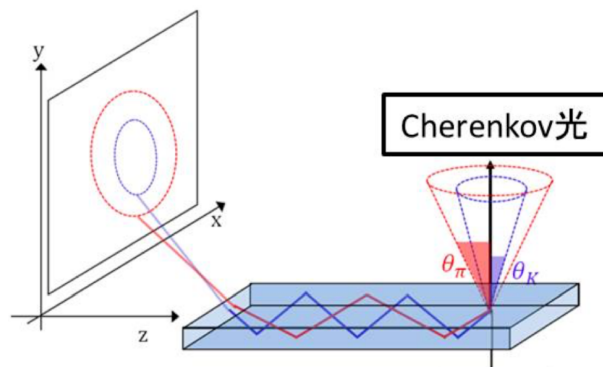


図 2.13: TOP による粒子識別原理の概要。

TOP では高い位置分解能と時間分解能を有する光検出器として MCP-PMT (Micro-Channel Plate Photo-multipleir tube) を採用した。その外観を (図 2.14) に示す。Belle II 測定器内部の高磁場中 ($1.5[\text{T}]$) で動作可能である。 $4 \times 4=16$ チャンネルのアノードプレートの内蔵し、1ch のサイズは 5.3mm 四方である。MCP-PMT の直径 $10 \mu\text{m}$ の穴で信号を増幅し、 $\mathcal{O}(10^6)$ の増幅率を得る。また、 50ps 以下と高い時間分解能を有する。



図 2.14: MCP-PMT の外観。

2.2.4 ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov)

Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) はエンドキャップ部での荷電 K/π 中間子識別を行う。荷電粒子が前段にある輻射体を通じた際に円錐状に発生するチェレンコフ光を、後段にある光検出器で二次元のリングイメージとして検出する。このリングの半径から荷電 K/π 中間子の識別を行う。

本検出器については 3 章で詳しく述べる。

2.2.5 ECL (Electromagnetic Calorimeter)

ECL は γ 線と電子のエネルギーを測定する検出器である。1 モジュールの外観と概要図を (図 2.15) に示す。タリウムをドーブしたヨウ化セシウム結晶シンチレータを使用する。 γ 線や電子がシンチレータに入射すると、それらはシンチレータ中でほぼ全てのエネルギーを失う。よって、シンチレーション光量を測定することで飛来した粒子の全エネルギーを知ることができる。また、電子と陽電子の弾性散乱である Bhabar 散乱の測定も行うことで、その頻度から加速器の루미ノシティを見積もる役割も担う。Barrel 部に 6624 モジュール、Endcap 部に 960 モジュール設置される。

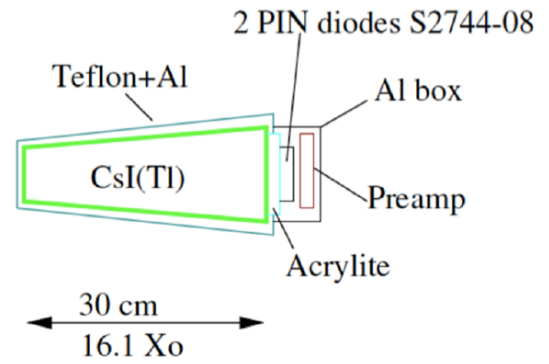


図 2.15: ECL1 モジュールの外観と概要図。

2.2.6 KLM (K_L^0 and muon)

KLM は K_L^0 と μ の粒子識別を行う検出器である。断面図を (図 2.16) に示す。Belle II 検出器の最外層に設置されており、ミュー粒子と、中性である K_L^0 を検出、識別する。 K_L^0 は鉄と相互作用し、KLM を通過せずに崩壊するが、ミュー粒子は物質を通過する性質を持つため KLM を通り抜ける。これにより、CDC 等の飛跡情報と合わせることで粒子識別が可能になる。

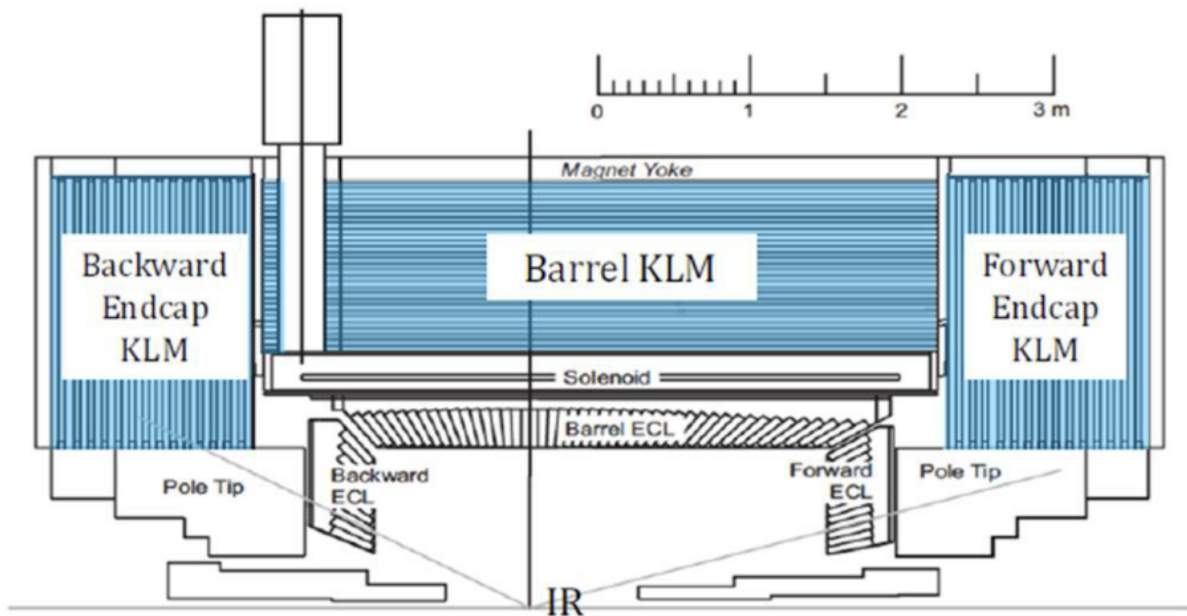


図 2.16: KLM の断面図。

2.2.7 データ収集システム

Belle II 実験では独自のデータ収集 (data acquisition:DAQ) システムを構築する。最大 30kHz のイベントレートの読み出しを行い、物理解析に必要な情報の取捨選択によってデータの削減も行う。

Belle II DAQ システムの概要図を (図 2.17) に示す。PXD 以外の各検出器の読み出し回路から Belle2Link と呼ばれる光ファイバーによって COPPER (COmmon Platform of Pipe-line Electronics Readout) にデータが送られるという共通の読み出しフレームワークを採用している。COPPER から 1 段目のイベントビルダーによってデータが統合された後、High Level Trigger (HLT)[13] システムで事象選別が行われる。PXD は膨大なデータ量を有するため、ONSEN(Online Select Node) と呼ばれるモジュールを用いてデータ読み出しを行う。HLT と ONSEN からのデータは 2 段目のイベントビルダーによって統合され、ストレージに保存される。

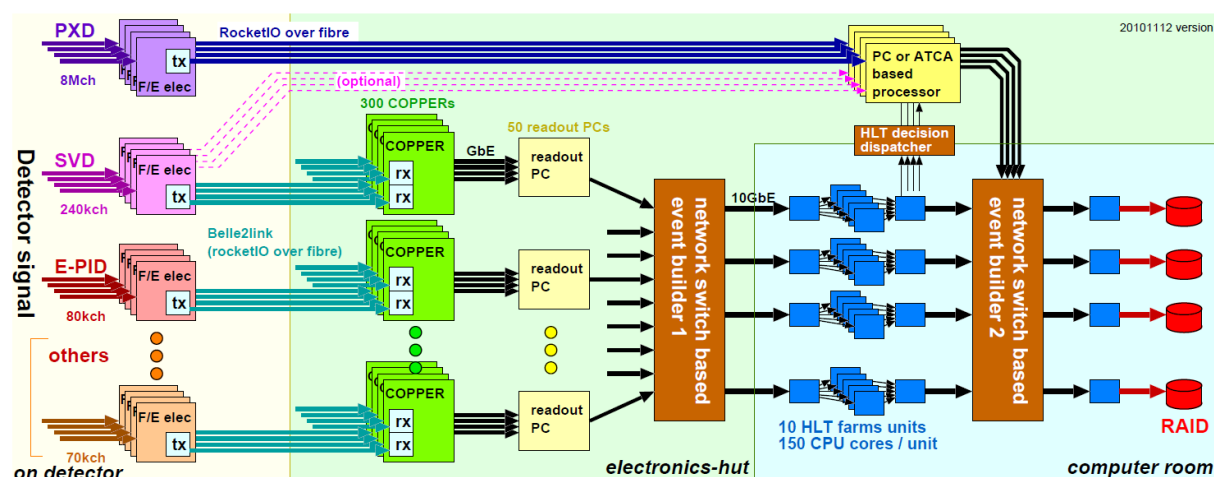


図 2.17: Belle II 実験のデータ収集システムの概要図。

第3章 ARICH 検出器

Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) はエンドキャップ部での荷電 K/π 中間子識別を行う。Belle 実験では Aerogel Cherenkov Counter (ACC) 検出器がこの役割を担っていた。ACC は閾値型の検出器であり $2\text{GeV}/c$ 以上での粒子識別能力が低いため、Belle II 実験では測定精度を向上させるべく、新たに開発を進めているのが ARICH である。この章では ARICH について詳しく説明する。

3.1 ARICH 検出器に要求される性能

新物理探索のための B 中間子の稀崩壊事象観測では $1.5\text{GeV}/c$ 以上の高運動量領域での荷電 K/π 中間子識別が求められる。Belle II 実験では電子・陽電子の非対称エネルギー衝突によってエンドキャップ部に高運動量の崩壊粒子が大量に飛来する。しかしエンドキャップ部に検出器を設置できるスペースはビーム軸方向に 280mm と限られている。このため、Time of Flight (TOF) による検出は時間差が小さく、非常に高い時間分解能が必要になるため不可能だった。

以上の理由から ARICH では、ACC のような閾値型ではなくチェレンコフ光の放射角を検出することで、 $0.5\text{GeV}/c \sim 3.5\text{GeV}/c$ の運動量領域で 4σ 以上の精度で荷電 K/π 中間子の粒子識別を行うことを目指す。

3.2 粒子識別原理

ARICH はその構造を大きく 2 つに分けることができる。崩壊粒子が飛来する方向に対して前段に位置する輻射体サイドと、後段に位置する光検出器サイドという構造である。ARICH では輻射体としてシリカエアロゲル、光検出器として HAPD を使用する。これらの詳細は後述する。

荷電粒子が ARICH に飛来し、輻射体であるエアロゲルを通過する際にチェレンコフ光が発生する。このチェレンコフ光は円錐状に発生し、その放射角 θ_c は質量 m との間に以下の式の関係を持つ。

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1} \quad (3.1)$$

ここで p は荷電粒子の運動量、 c は真空中の光速、 n は輻射体の屈折率である。運動量 p は CDC から得られ、屈折率 n はエアロゲルを製作する際に任意に調節できる値である。そのため、放射角 θ_c を測定することで質量 m を知ることができ、粒子の種類が特定できる。

円錐状に放射されたチェレンコフ光は後段の光検出器 HAPD を用いて検出される。検出された位置情報から 2 次元リングイメージを作成し、その半径から以下の式で θ_c を算出する。

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{r}{L}\right) \quad (3.2)$$

ここで L はチェレンコフ光発生点から検出器までの放射距離、 r はリング半径である。

ARICH では以上の原理で荷電 K/π 中間子の粒子識別を行う。

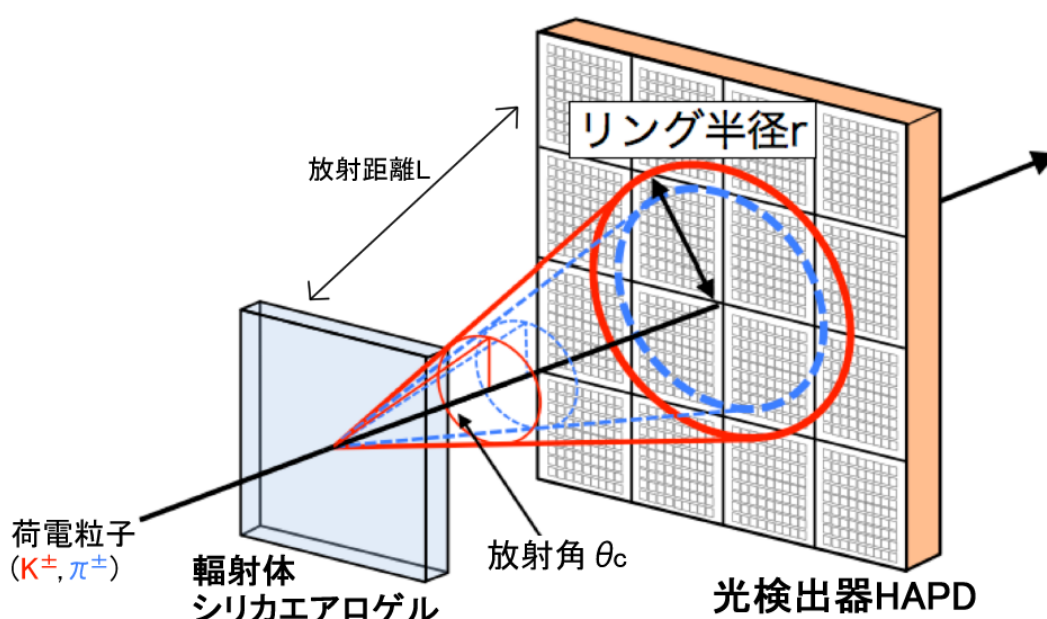


図 3.1: ARICH の荷電 K/π 中間子識別原理の概念図

3.3 ARICH 検出器の構造と構成要素

(図 3.2) に構造イメージを、(図 3.3) に ARICH の設計図を示す。ARICH は BelleII 測定器のエンドキャップ部に設置されるため、中央部をビームラインが通るために開けた、ドーナツ型の検出器になる。

ARICH では構成要素である輻射体シリカエアロゲル、光検出器 HAPD、信号読み出しシステムを円周上に層のように並べる。ARICH 全体を設置できるビーム軸方向の長さは 280mm である。エアロゲル層 40mm、チェレンコフ光放射空間層 160mm、HAPD 層 30mm、そして読み出しシステム層に残りの 50mm を使用する。

また、ARICH の HAPD サイドでは全体を 60 度、HAPD70 本ごとに分割した領域を「セクター」と呼び、建設・試験の際にこの単位で管理を行っている。右上から時計周りにセクター 1～6 としている。

この節では各構成要素の詳細を説明する。

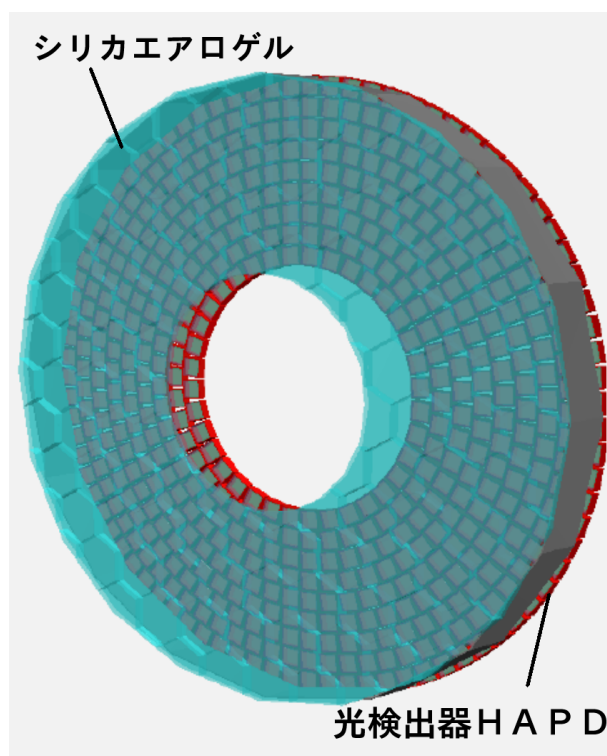


図 3.2: ARICH の構造イメージ。全体はドーナツ型で、輻射体と光検出器が層状に重ねられる。

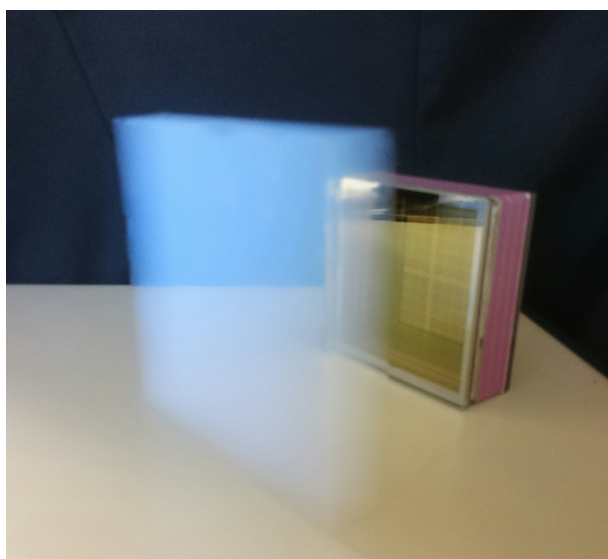


図 3.4: シリカエアロゲルの外観。光透過性が高い。表面のレイリー散乱のため、青みがかって見える。

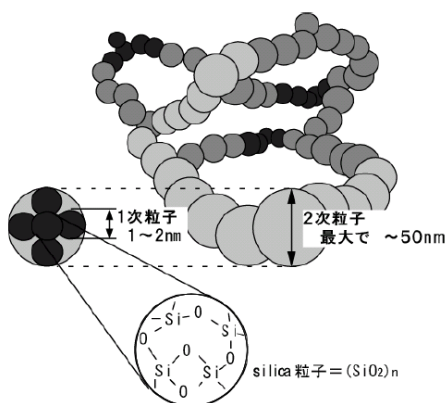


図 3.5: シリカエアロゲルの内部構造。SiO₂ が3次的に配列している。

ARICH ではこのシリカエアロゲルを密度の異なった2層に重ねて設置する、デュアルレイヤー方式を採用した。これは単層方式と輻射体の厚みが同じためチェレンコフ光の発生光子数を維持した上で、単層方式と比べてチェレンコフ光放射角の分解能を向上することができる。(図 3.6) にその概念図を示す。二次元的にリングイメージとしてチェレンコフ光を検出する時、輻射体の上流から下流のどこで発生した光であるか判断できないため、その放射角の測定精度は範囲をもったものになる。このため、単層方式では発生光子数の確保のために輻射体を厚くすると、角度分解能が悪くなってしまう。そこで上流と下流で異なった屈折率 n_1, n_2 をもつ2枚の輻射体を重ねて設置し、屈折率を $n_1 < n_2$ とすることで、上流で発生したチェレンコフ光

と下流で発生したチェレンコフ光を絞ることができ、角度分解能が向上する。

0.5GeV/c 以上の荷電 π 中間子でのチェレンコフ光の発生に必要な屈折率は 1.05 である。ARICH では上流に $n_1 = 1.045$ 、下流に $n_2 = 1.055$ の密度に調整したシリカエアロゲルを使用する。

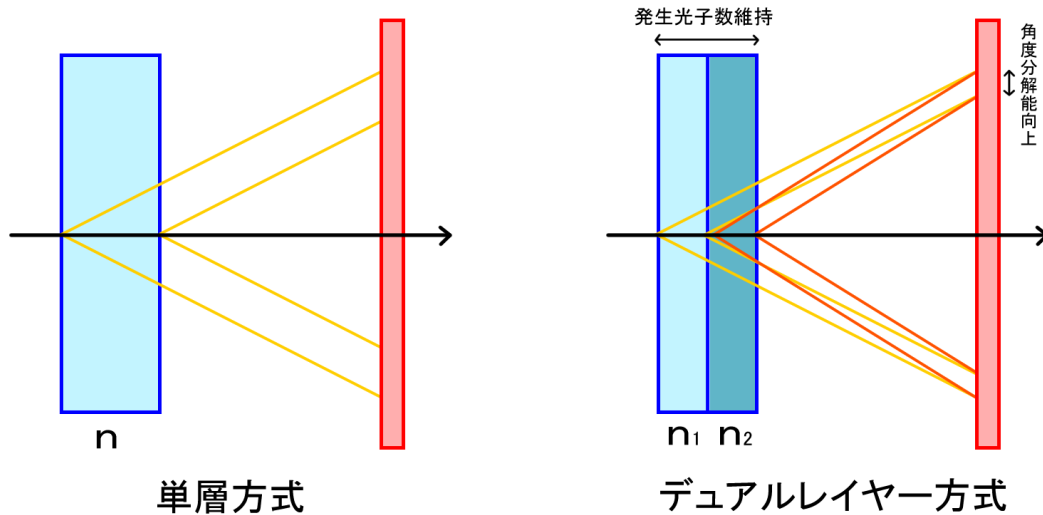


図 3.6: デュアルレイヤー方式の概念図。発生光子数を維持したまま角度分解能を向上できる。

3.3.2 光検出器 HAPD

ARICH で光検出器に要求される性能は大きく 3 点である。まず、発生するチェレンコフ光は 1 飛跡あたり 30 個程度の光子になるため、リングイメージを再構成するためには単一光子検出が可能である必要がある。また、リングイメージの半径差から粒子識別を行うため、ARICH の放射空間 160mm の場合 5mm 以下の位置分解能を有する必要がある。そして Belle II 測定器内は 1.5T の高磁場中であるため、この中での動作が可能である必要がある。

以上の要求を満たす光検出器として、144ch マルチアノード型 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) を浜松ホトニクス (株) と共同で開発し、採用した。(図 3.7) に外観を、(図 3.8) に基本設計図を示す。また、仕様を (表 3.1) に示す。

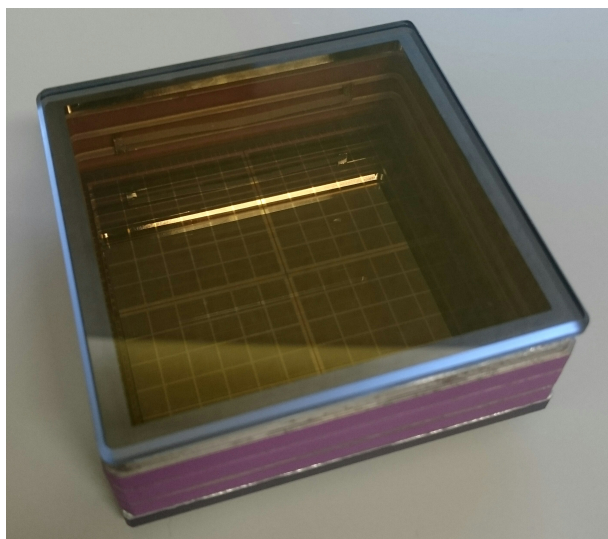


図 3.7: HAPD の外観。

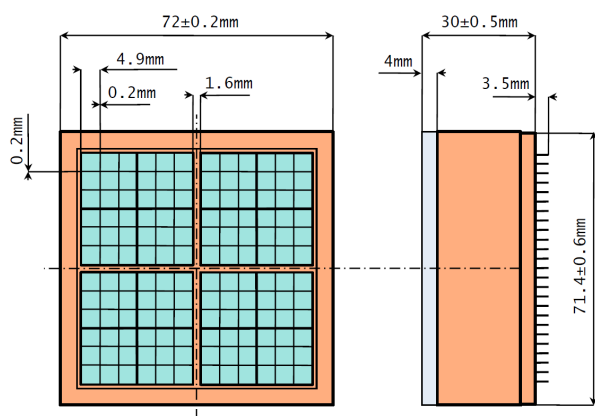


図 3.8: HAPD の基本設計図。1 ピクセルごとに単一光子検出が可能で、高い位置分解能を有する。

表 3.1: HAPD の仕様

外寸		$73 \times 73 \times 28\text{nm}^3$
総チャンネル数		$12 \times 12=144\text{ch}$
有効面積		65 %
入射窓	材質	合成石英
	厚さ	3mm
光電面	材質	スーパーバイアルカリ
	量子効率	波長 400nm で ~ 28 %
APD	チップ数	4
	チップサイズ	$4.9 \times 4.9\text{mm}^2$
	逆 Bias 電圧	$\sim 400\text{V}$
	Avalanche 増幅	~ 40
電子打ち込み	電子加速用電圧	$\sim -8500\text{V}$
	打ち込み増幅	~ 1700
S/N 比		~ 15

HAPD の動作原理の概念図を (図 3.9) に示す。HAPD は入射窓の内側にスーパーバイアルカリと呼ばれるアルカリ合金を蒸着させて光電面とし、これが光電陰極になる。チェレンコフ光と同程度である 400nm 程度の波長領域で 28 % 以上の高い量子効率を有する。

HAPD 内には APD(Avalanche photo diode) がピクセル化されて配列している。APD は Avalanche 増幅を利用した受光ダイオードの一種である。その増幅原理を (図 3.10) に示す。逆バイアスを印加することにより空乏層が形成された APD に光電子が入射することで電子-正孔対が発生する。それぞれが逆バイアスによってドリフト運動し、電極に向かう。電極付近は電場勾配が高くなっており、空乏層内の格子原子や不純物と衝突して 2 次キャリアを形成し、これが更に同様に次のキャリアを励起させるのが Avalanche 増幅である。最終的には入射光電子数に比例した電圧パルスとして検出する。

この APD による増幅率は 40 程度である。一般的な光電子増倍管の増幅率である $O(10^6) \sim O(10^8)$ に比べて低い。そこで HAPD では光電面から APD への入射までの真空領域に高電圧による電場を作り、光電子を加速する。APD への入射エネルギーを上げることで電子-正孔対生成数が増える仕組みである。この電子打ち込み増幅により 1700 程度の増幅率を得ることができる。電子打ち込み増幅と Avalanche 増幅により HAPD は最終的には 68000 程度の増幅率を得て、単一光子検出が可能となる。(図 3.11) に電子打ち込み増幅、Avalanche 増幅それぞれの印加電圧と増幅率の関係を示す。

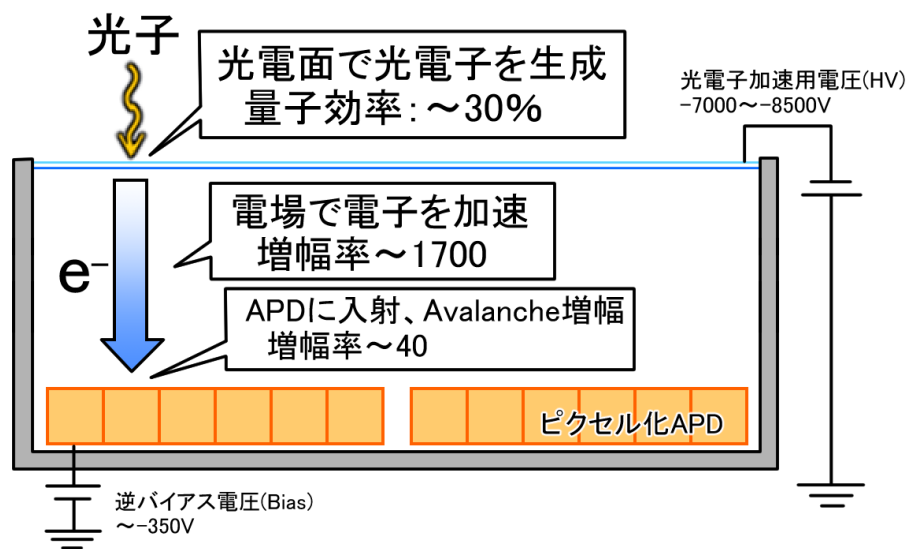


図 3.9: HAPD の動作原理

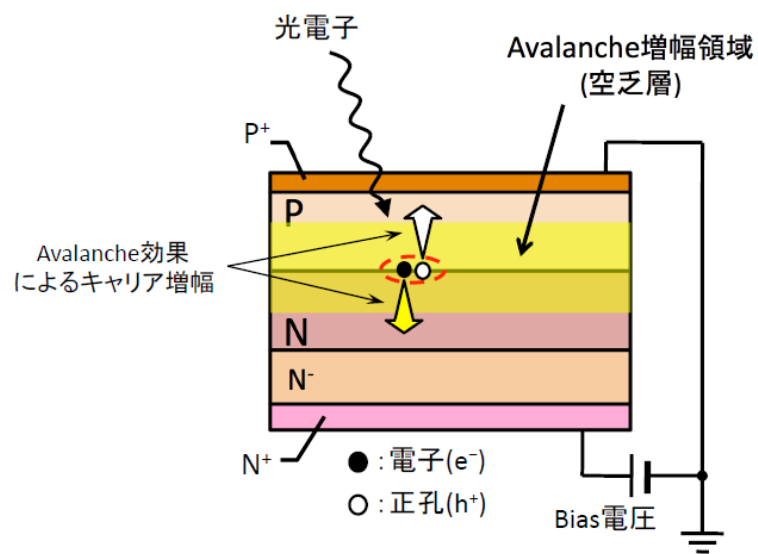


図 3.10: APD による Avalanche 増幅の原理

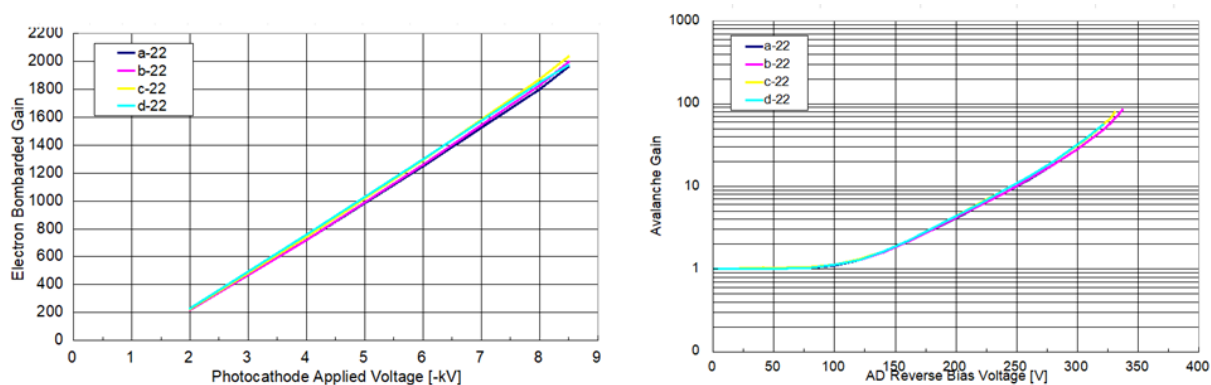


図 3.11: HAPD への印加電圧と増幅率の関係。実際の HAPD の一例。左図が電子打ち込み増幅、右図が Avalanche 増幅の図である。各線は APD1ch を表す。

3.3.3 信号読み出しシステム

ARICH 検出器は前述の通り設置領域が限られている。読み出しシステムが使用できるビーム軸方向の空間的余裕は、エアロゲル 40mm、HAPD30mm、チェレンコフ光の拡散距離 160mm を除いた 50mm に限られる。この領域内に全 6 万チャンネルを超える信号を処理する読み出しシステムを収めるため、ARICH では”Front-end board (フロントエンドボード、FEB)”と”Merger board (マージャーボード、MB)”と呼ばれる高集積化された専用読み出し回路を開発した。フロントエンドボード、マージャーボード共に FPGA チップを搭載しており、外部から Belle2Link を通じて設定の操作が可能である。(図 3.12) に信号読み出しシステムの概念図を示す。HAPD1 本ごとにフロントエンドボードを 1 枚使用し、フロントエンドボード 5～6 枚につきマージャーボードを 1 枚使用する。よって ARICH 全体でフロントエンドボードは 420 枚、マージャーボードは 72 枚使用する。

Belle II DAQ

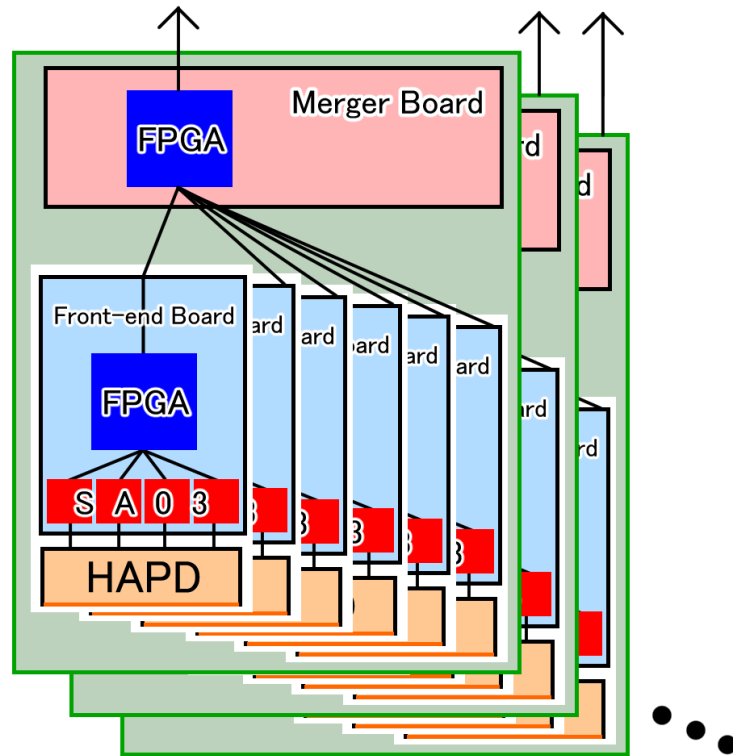


図 3.12: ARICH 信号読み出しシステムの概念図。データは図の下から上へと送られていく。

(図 3.13) にフロントエンドボードの外観、(図 3.14) にフロントエンドボードを構成する回路の概要を示す。フロントエンドボードは HAPD からのアナログ信号をデジタル信号に変換し、マージャーボードに送信する役割を担う。1 枚につき、専用に開発した ASIC である”SA03”が 4 チップ、FPGA が 1 チップ搭載されている。

SA03 は増幅器、波形整形器、比較器を持つ。HAPD から送られてくるアナログ信号を比較しやすいよう増幅、波形の立ち上がり時間を調整し、閾値電圧と比較してこれを超えた際にデジタル信号を出力する。閾値電圧はフロントエンドボードごとに単一の値しか設定することができないが、SA03 のチャンネルごとにオフセット電圧を調節することで、HAPD チャンネルごとに個体差のあるアナログ信号に対して最適な比較を行うことができる。オフセット調節は粗調節 16 段階、微調節 16 段階を組み合わせた 256 段階で行うことができる。また、増幅機能は増幅率を 4 段階に設定が可能のため、オフセット調節のみで最適な比較が行えない場合に増幅率を変更することが可能である。

FPGA はパラメータ”hdcycle”で設定されたクロック数ごとに SA03 からデータを取得し、シ

フトレジスタに保存する。データ取得の時間幅 (time-window) は (クロック周期) \times (hdcycle) となる。シフトレジスタは 8bit のデータを保存しており、外部からのトリガーが入力されると上位 4bit をデジタル信号としてマージャーボードに送信する。この時、外部トリガーの入力からデータの送信開始までの遅延時間をパラメータ”trgdelay”で調節できる。この時間は (クロック周期) \times (hdcycle) \times (trgdelay) で求めることができる。cdcycle、trgdelay は 32 段階で設定可能である。また、FPGA は SA03 のパラメータ設定も行う。

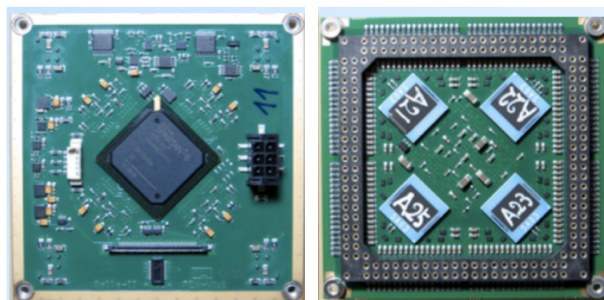


図 3.13: フロントエンドボードの外観。左はマージャーボード側、右は HAPD 側。

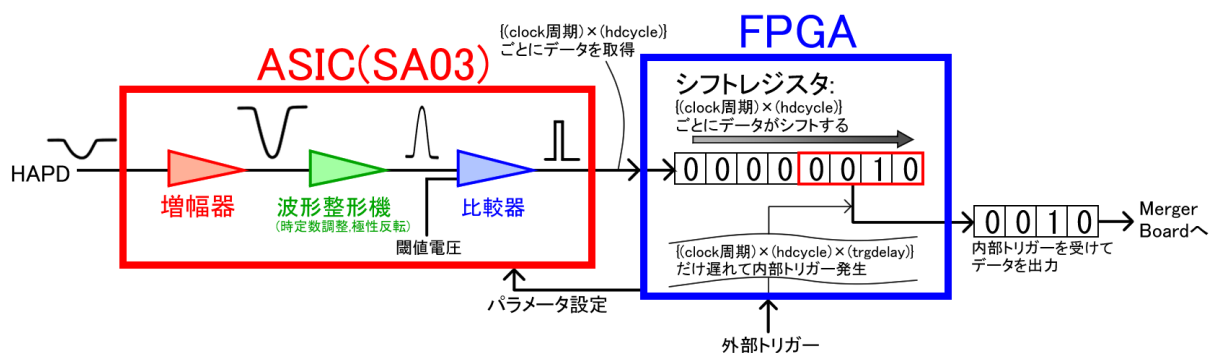


図 3.14: フロントエンドボードを構成する回路の概要。ASIC と FPGA からなる。

(図 3.15) にマージャーボードの外観を示す。マージャーボードは最大 6 枚のフロントエンドボードから送られてきたデータを Belle2Link を通じて Belle II DAQ システムに送る役割を担う。

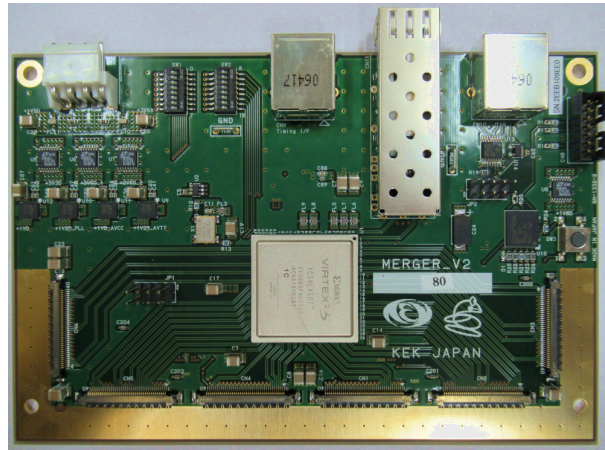


図 3.15: マージャーボードの外観。

スレッシュホールドスキャン (Threshold Scan)

SA03 から出力される信号はデジタル信号であり、ARICH の読み出しシステムでは HAPD からのアナログ波形を直接得ることはできない。そこで、比較器の閾値電圧とその時のヒット率を測定することで間接的にアナログ波形情報を得ることができる。この測定方法をスレッシュホールドスキャン (Threshold Scan) と呼ぶ。

スレッシュホールドスキャンの概念図を (図 3.16) に示す。図左側の波形は SA03 の比較器へ入力されるアナログ信号で、横軸時間に対する縦軸波高電圧の変化を表すイメージである。図右側の波形は比較器の閾値電圧 (縦軸) を変化させたときの検出イベント数 (あるいはヒット率) を示したヒストグラムである。入力アナログ信号が図左側のようなイメージの時、対応する図右側のようなスレッシュホールドスキャンの結果が得られる。

図の (a) ノイズのみが入力されたと仮定した場合、スレッシュホールドスキャンの結果は図のようなピークを持つ。ノイズの波高が Gauss 分布に従うと仮定して、ヒストグラムのピークを Gauss 関数 (式 3.3) で近似する。

$$\frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3)$$

この Gauss 分布の標準偏差 σ をノイズの波高値と定義し、中央値 μ はそのチャンネルのオフセット電圧値を表す。

図の (b) のようにノイズの無い理想的なパルス信号が入力されたと仮定した場合、スレッシュホールドスキャンの結果は矩形となる。 V_{th} の低い方の縁がオフセット電圧値、高い方の縁がパルスの最大値に対応する。2つの縁の差を求めることで入力アナログ信号の波高値を得ることができる。この矩形を近似するには誤差関数 (式 3.4) と相補誤差関数 (式 3.5) を使用する。

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.4)$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.5)$$

また、(式 3.5) は近似させる場所によって以下のように使い分ける。

$$\frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{V_{th} - \mu_{sig}}{\sqrt{2}\sigma_{sig}}\right) : (\text{upperside}) \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\frac{V_{th} - \mu_{ofs}}{\sqrt{2}\sigma_{ofs}}\right) : (\text{lowside}) \quad (3.7)$$

ここで V_{th} は誤差関数の変数としての閾値電圧である。 σ と μ は式 3.3 で定義したもので、添え字 sig は入力波形の最大値での、ofs はオフセット電圧値での誤差関数のものである。これら 2 つの誤差関数の中央値の差 $\mu_{sig} - \mu_{ofs}$ を求めることで入力パルスの波高値を知ることができる。

実際に HAPD が 1 光子程度の光を検出した場合に SA03 の比較器に入力される信号は図の (c) のようにノイズとパルスを足し合わせたような形になる。スレッシュホールドスキンの結果も (a) と (b) の結果を足し合わせたようになる。ただし 1 光子相当信号の最大値は理想的なパルスと異なり、測定ごとにノイズによるずれが生じるためスレッシュホールドスキンの結果の矩形部分も丸みを帯びたものになる。(a),(b) と同様の解析をすることでノイズの分布の中央値を μ_0 、1 光子相当信号の最大値を μ_1 として $\mu_1 - \mu_0$ を求めることにより、1 光子によるアナログ信号波高値を知ることができる。

以上のようにしてスレッシュホールドスキンを行い、その結果を解析することで HAPD からアナログ信号情報を得ることができる。

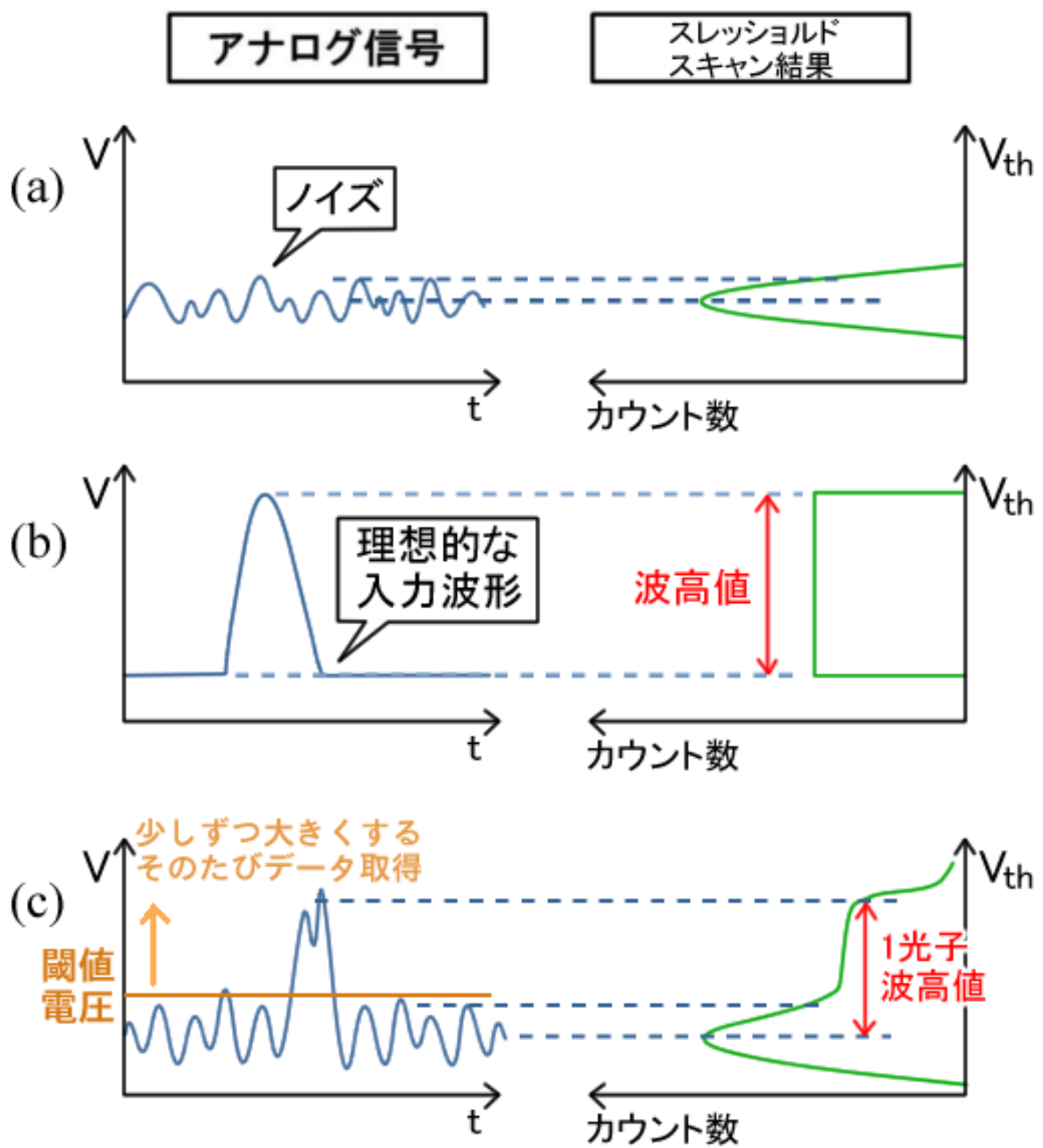


図 3.16: スレッショルドスキャンの概念図。左側が SA03 に入力されるアナログ信号のイメージ、右側がそれに対応したスレッショルドスキャンの結果。

第4章 ARICH モニターシステム

ARICH 検出器は Belle II 実験で電子・陽電子の衝突によって発生する荷電粒子が通過する際に発される Cherenkov 光を検出することによって粒子識別をする検出器である。ARICH モニターシステムは ARICH 検出器が光を正常に検出することができているかを定期的に確認するためのシステムである。

この章では ARICH モニターシステムによる動作確認方法と、ARICH モニターシステムを構成する各要素について解説する。

4.1 モニターシステムの概要

ARICH 検出器では前述の通り光検出器 HAPD を用いてチェレンコフ光の検出をすることが必要になる。ARICH 検出器は SuperKEKB 加速器運転中に放射線に曝される。そのため HAPD は特に中性子線による損傷、性能劣化が予想されている。HAPD チャンネルのヒット位置を元にリングイメージを生成する ARICH 検出器では粒子識別性能の維持のため、全 6 万以上の HAPD チャンネルの動作確認をする必要がある。そのため LED による光を用いて HAPD の光検出試験を行う、ARICH モニターシステムを開発した。

Belle II 実験開始時期に関してはビームデータによる性能確認が困難であるため、組み上げたシステムの健全性の確認に使用する。Belle II 実験安定期に関しては各チャンネルの生死判定および、出力変化時のキャリブレーション用光源として使用する。

4.1.1 モニター方法

ARICH 検出器は前述の通り空間的な制限があるため、モニターシステムを組み込むにあたって空間を大きく占有することができない。また、同時に全 HAPD の動作確認を行うため、全 HAPD に光が一様に行き渡る設計が必要である。以上の要求により開発されたモニター方法を解説する。

モニターシステムでは LED 光を HAPD に照射する必要があるが、HAPD 前面にはエアロゲルが敷き詰められており、LED を設置する空間的余裕が無い。そのため、LED 光を光ファイバーを通して読み出し HAPD 背面側から ARICH 検出器内部に導入して HAPD の間を通し、

エアロゲルに向けて光を照射する。この光がエアロゲルによって散乱されることで HAPD に LED 光が入射する仕組みとなる (図 4.1 参照)。

光を全 HAPD に一様に行き渡らせるため、光ファイバーを複数本使用する。先行研究により、各光ファイバーの設置間隔を約 15cm にすることで ARICH 検出器内部に十分 LED 光を行き渡らせることができることが示された。このため 1 セクターにつき 15 本の光ファイバーを導入し、ARICH 検出器全体で合計 90 点から光を照射して検出器内部に行き渡らせる。

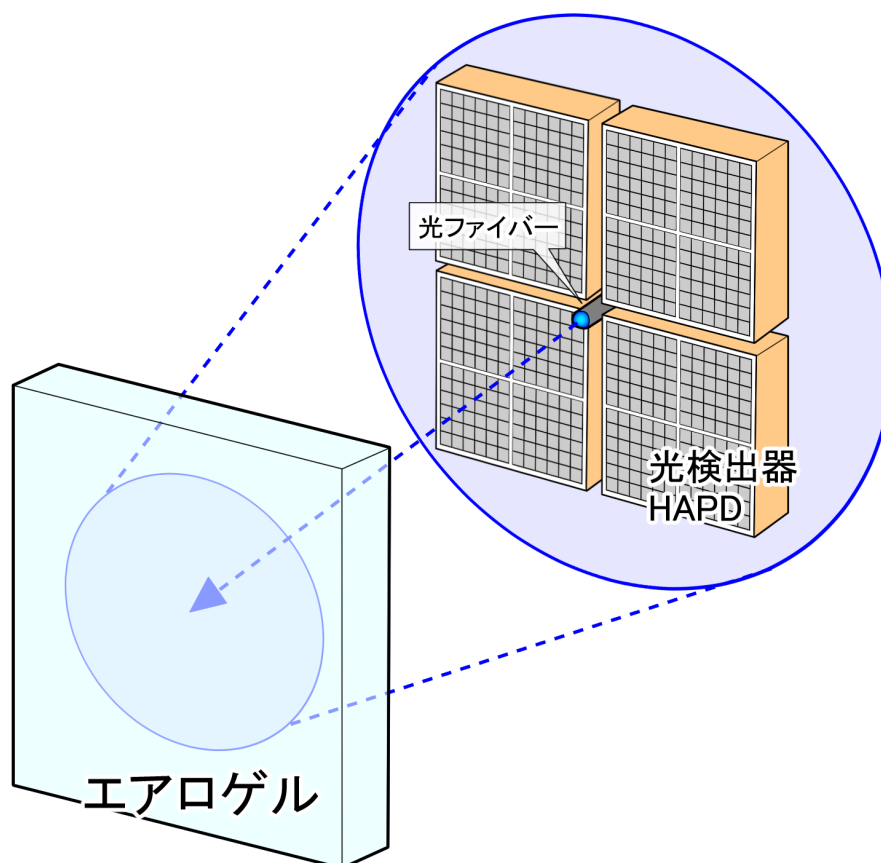


図 4.1: モニターシステムの概念図。HAPD の隙間に光ファイバーを通し、LED 光をエアロゲルに照射し散乱させる。

光ファイバーバンドル

モニターシステムでは ARICH1 セクターに 15 本の光ファイバーを設置する。実際には枝分かれした光ファイバーバンドル (フジクラ社製) を使用する (図 4.4)。光ファイバーバンドルは 22 本に分岐しており、22 本の光ファイバーには No1~22 の番号が振られている。また、分岐ファイバーの長さは 4 種類となっており、同じ長さの光ファイバーのまとまりを「ブランチ」と呼ぶ。No1~5 が長さ 50cm、No6~11 が 80cm、No12~16 が 110cm、No17~22 が 140cm のブランチとなっている。ARICH1 セクターにつき 1 セットのバンドルを使用するため、ARICH 全体で 6 セット使用する。

分岐ファイバー先端の端末スリーブはアルミニウム製であり、表面を酸化アルミニウム皮膜で覆われている。また、分岐ファイバー先端には光を拡散させるためのレンズが装着されている。拡散レンズには開口数 (Numerical Aperture : NA) と呼ばれるレンズの分解能を求めるための指数があり、この値が拡散角に関係している。拡散レンズの設計値である $NA=0.4$ は、物体とレンズの間の物質が空気 ($n=1$) である場合拡散角にしておよそ 47° に相当する。



図 4.4: モニターシステム用光ファイバーバンドル

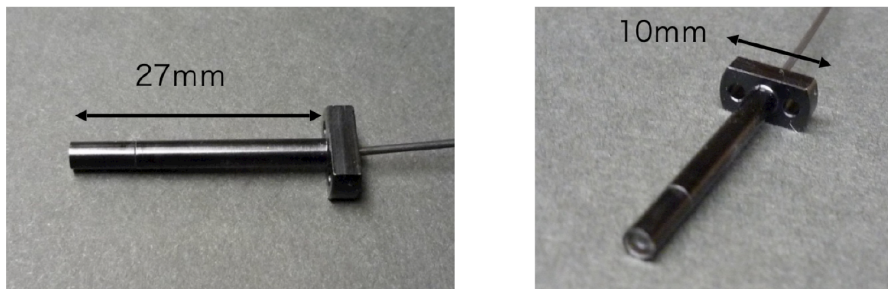


図 4.5: 光ファイバー先端

表 4.1: モニターシステム用光ファイバーの仕様

項目	構造及び特性
ファイバー種別	純粋石英コア (高 OH) ファイバー
コア径	$118 \pm 5\mu m$
クラッド径	$125 \pm 5\mu m$
開口数 (NA)	0.21 ± 0.02
一次被膜	エポキシ系樹脂
保護チューブ	ポリエチレン
チューブ外径	$0.9 \pm 0.1mm$
伝送損失	100dB/km 以下 ($\lambda = 400nm$)
許容曲げ半径	R40mm

表 4.2: 光ファイバーアセンブル品の仕様

項目		構造及び特性
ファイバー心数		22 心
集束側端末		905 SMA コネクタ付き
分岐側端末	端末形状	レンズ付き端末スリーブ× 22 端末
	レンズ仕様	合成石英ガラスレンズ
	拡散角	約 47°
	レンズホルダ	ネジ (M2) 脱着式
耐熱温度		両端面:80℃ (その他:60℃)

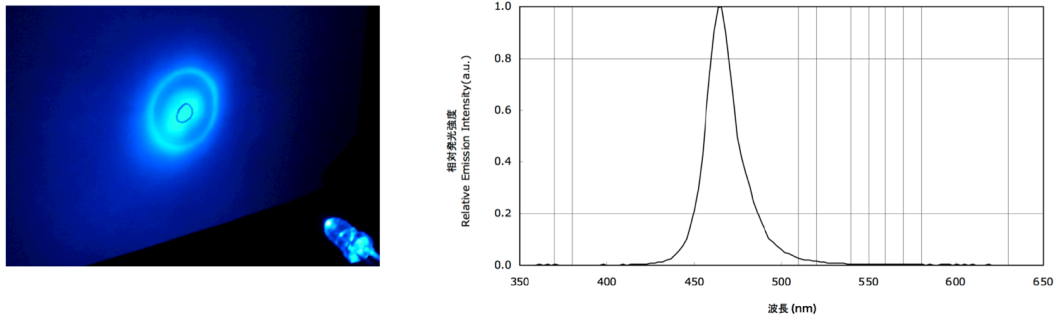


図 4.7: LED 光源発光の様子と、発光スペクトル (周囲温度 25 °C、電流 20mA)

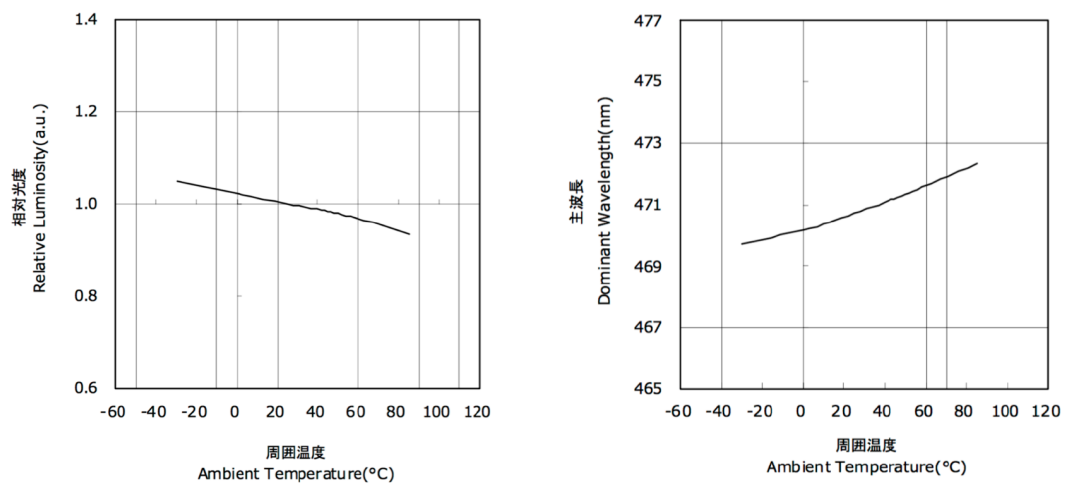


図 4.8: 相対光量と主波長の温度依存性 (電流 20mA)。

ファイバー接続具

LED 光源と光ファイバーバンドル間を接続するため、円筒状の接続具が採用された。円筒内に LED 光源を設置し、SMA レセプタクル (905D-R181-001) を用いて光ファイバーと接続し、光を導入する。(図 4.9) に外観を示す。図の左は接続具の外観、中央は接続具内部に LED 光源を設置した様子、右はバンドルと接続具を接続した様子である。

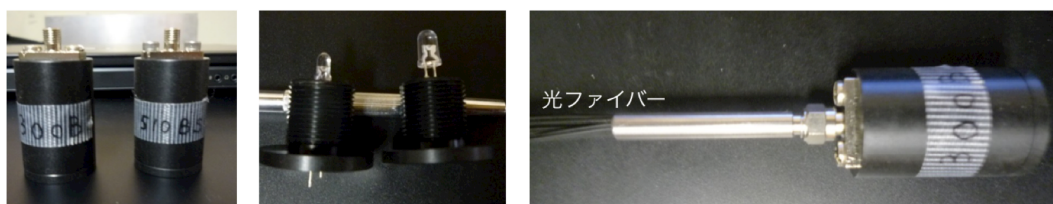


図 4.9: LED・光ファイバーバンドル接続具。左図は接続具の外観。中央図は接続具内部に LED 光源を設置した様子。右図はバンドルと接続具を接続した様子。

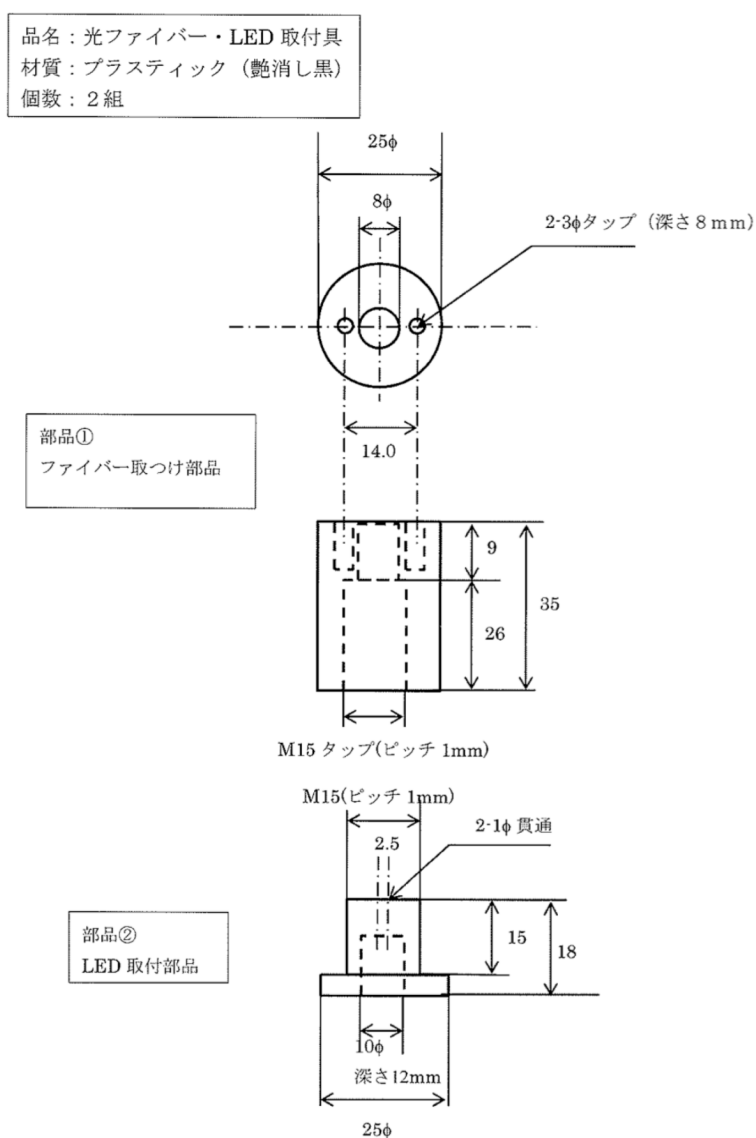


図 4.10: 接続具の設計図。

ライトパルサーモジュール

LED 光源を光らせるためのパルス信号を出力する NIM 規格のモジュールで、Belle 実験 ACC のモニターシステムで使用されていたものを流用する。NIM 信号の入力があった際にアナログパルスを出力する。

出力パルスは 2 つのツマミを調節することで波高値 (Amplitude) と時間幅 (Width) を調節できる。Amplitude ツマミの値は 0~1000 で実際の出力波高は約 1V~7V。Width ツマミの値は 0~1000 で実際の出力波高は約 20ns~100ns。波高値は 0.01V 以下の精度で調節が可能。時間幅は 4ns 程度の精度で、連続的な調節はできない。出力は 6 チャンネルあり、1 台で 6 個の LED に出力が可能。全て同じ形のパルスが出力される。



図 4.11: ライトパルサーモジュールの外観。信号の入力があると右上のランプが点灯する。

延長用光ファイバー

ARICH モニターシステムでは LED 光源や接続具のメンテナンスの容易性を考慮し、それらを Belle II 測定器の外部に設置する。Belle II 測定器の外部から ARICH 内部に設置される光ファイバーバンドルまで光を導入するため、延長用光ファイバーとしてファイバーパッチケーブル (THORLABS 社製 M29L シリーズ) を採用した。

延長用光ファイバーは ARICH 検出器内部からエンドキャップ部のケーブル集合部までの間に使用する 1m ファイバーと、エンドキャップ部から Belle II 測定器外部の Electronics Hut(E-hut) までの間に使用する 40m ファイバーの二種類を使用する。40m パッチケーブルは特注品のためジャケットが 3.8mm 径であり、1m パッチケーブルの 3.0mm 径と異なるが、それ以外の仕様は同様のものとなる。

ファイバーバンドル、1m パッチケーブル、40m パッチケーブル間を接続するための SMA-SMA アダプタは1 セクターにつき 2 個、ARICH 全体で合計 12 個使用する。



図 4.12: ファイバーパッチケーブル (1m) の外観



図 4.13: ファイバーパッチケーブル (40m) の外観

表 4.3: ファイバーパッチケーブルの仕様

項目	特性
端末	905 SMA コネクタ
コア径	$600 \pm 10\mu m$
クラッド径	$630 \pm 10\mu m$
開口数 (NA)	0.39
波長領域	400～2200nm

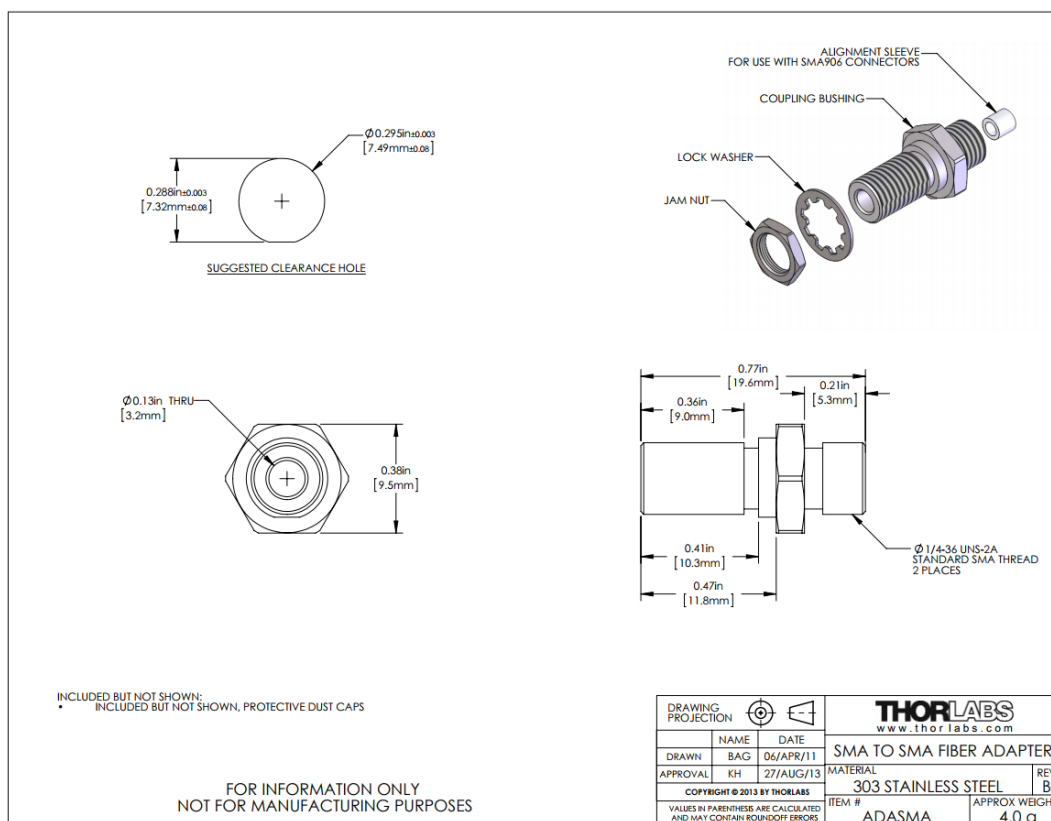


図 4.14: SMA-SMA アダプタの仕様書。

4.2 モニターシステムの開発

ARICH モニターシステムは HAPD の動作確認を行うという目的を満たすことのできる性能を持つよう開発された。先行研究により、各構成要素の性能評価と、小さいセットアップによる試験運用が行われた。

本研究ではそれを前提として実装を進めたため、この節で結果を簡単に示す。より詳しい内容は [10] を参照。

4.2.1 構成要素の性能評価

光ファイバーごとの光量のばらつき評価

各ファイバーバンドル、および各分岐ファイバーごとの光量のばらつきの測定を行った。LED 光源から暗箱中の光ファイバーバンドルに光を導入し、各分岐ファイバー先端からの光を PMT の光電面に照射して測定した。

測定結果を (図 4.15) に引用し、示す。図の青い帯は各分岐ファイバーの光量平均値から $\pm 10\%$ の範囲を表す。この結果から、分岐ファイバーの光量は多くが平均値から 10% 程度のぶれに収まることがわかる。これは光源自体の光量のふらつき、光源から各分岐ファイバーに導入される光量のむら、各測定での設置精度が原因であると考えられる。ファイバーバンドルごとでも光量差が見られるが、同様に光源のふらつきや接続具の設置精度のむらが原因であると考えられる。

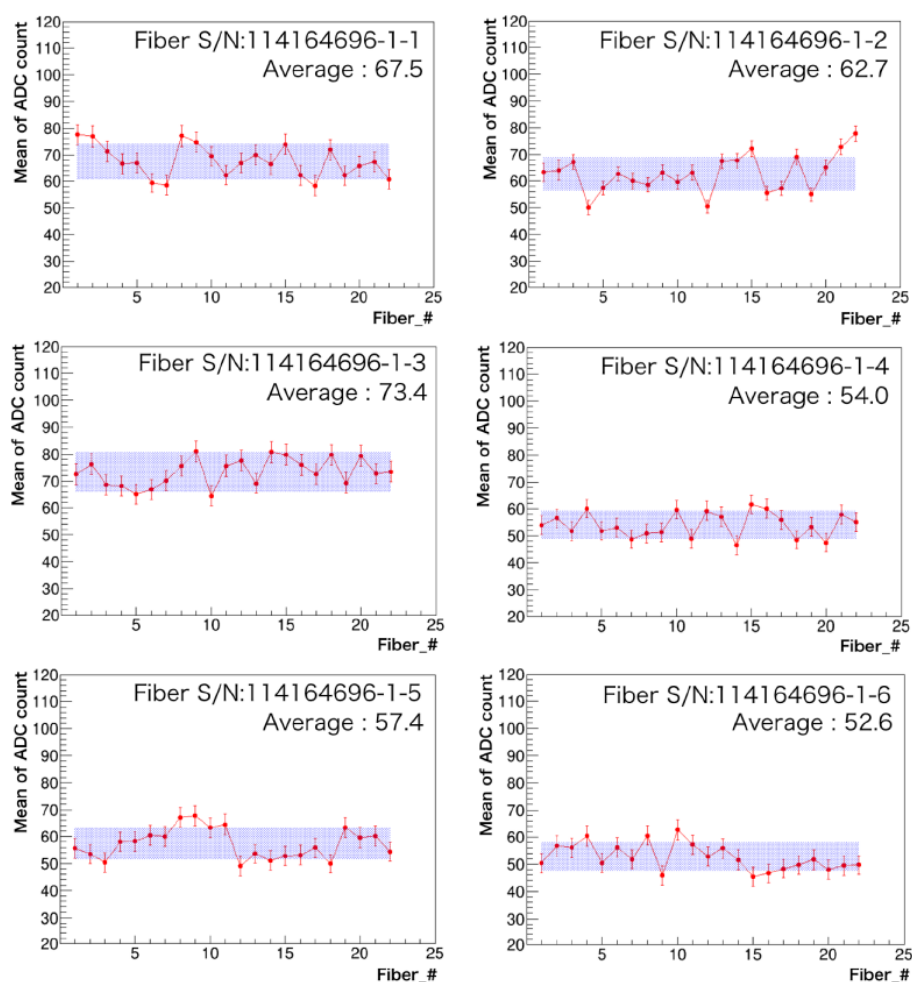


図 4.15: 光ファイバーバンドルごとでの光量のばらつき。[10, p.66]

光拡散レンズの拡散角測定

分岐ファイバー先端の光拡散レンズによる拡散角の測定を行った。LED 光源から暗箱中の光ファイバーバンドルに光を導入し、分岐ファイバー先端からの光を PMT の光電面に照射して光量を測定した。PMT を 1cm ずつ移動し、各位置での検出光量を測定することで拡散角を

知ることができる。

測定結果を (図 4.16) に引用し、示す。X=5.5cm の位置で拡散角 47° であり、NA=0.4 に相当する。この位置で光子の検出ができており、拡散レンズの要求性能が満たされていることが確認できる。

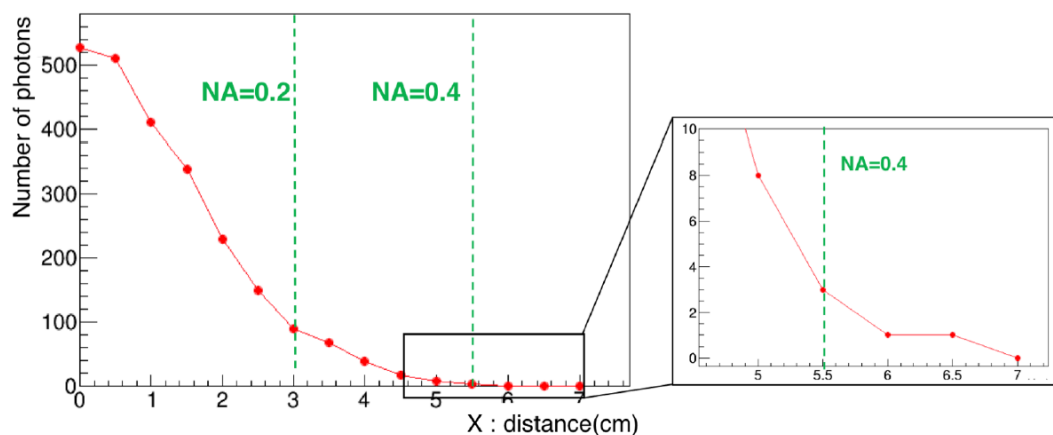


図 4.16: 横軸 PMT の移動距離 X[cm]、縦軸検出光子数。[10, p.68]

4.2.2 モニターシステムの原理検証

先行研究により、暗箱内に分岐ファイバーの先端、エアロゲル、HAPD を設置し、ファイバー先端からの光をエアロゲルが反射し、HAPD で検出が可能であることが確かめられた。セットアップの概念図を (図 4.17) に引用し、示す。HAPD を移動させることができ、エアロゲルからの反射光が十分に拡散しているかを確かめられる。光ファイバーと HAPD 中心との距離を D[cm] とした。

測定結果を (図 4.18) に引用し、示す。HAPD を 1cm ずつ移動し、移動ごとに HAPD の中で電場が安定したある 1 チャンネルのヒット率をプロットした図である。

散乱光がファイバー先端からの距離によって指数関数に従うように減少することと、35cm 付近まで検出できることがわかる。ファイバーは 15cm 間隔で設置されるため、この原理により ARICH のモニターを行うことが可能であると考えられる。

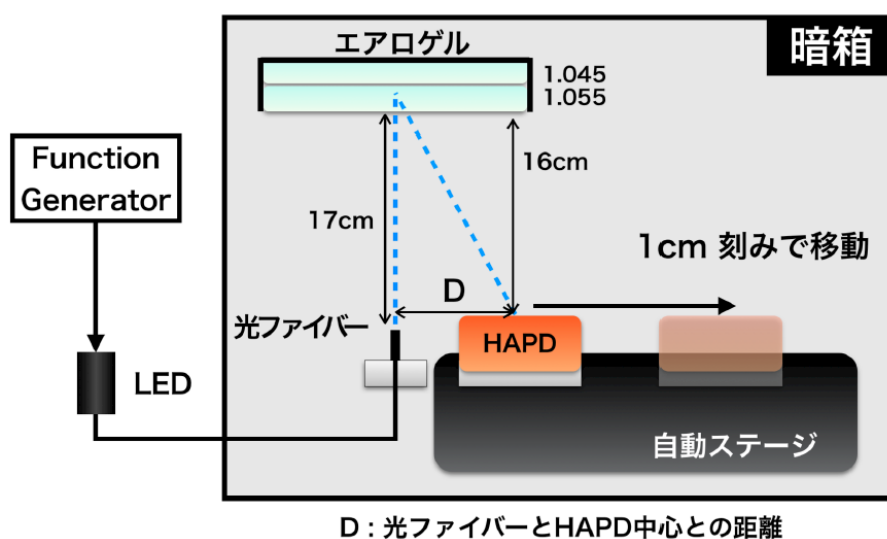


図 4.17: 散乱光測定時のセットアップ概念図。光ファイバーと HAPD 中心との距離を $D[\text{cm}]$ とした。[10, p.69]

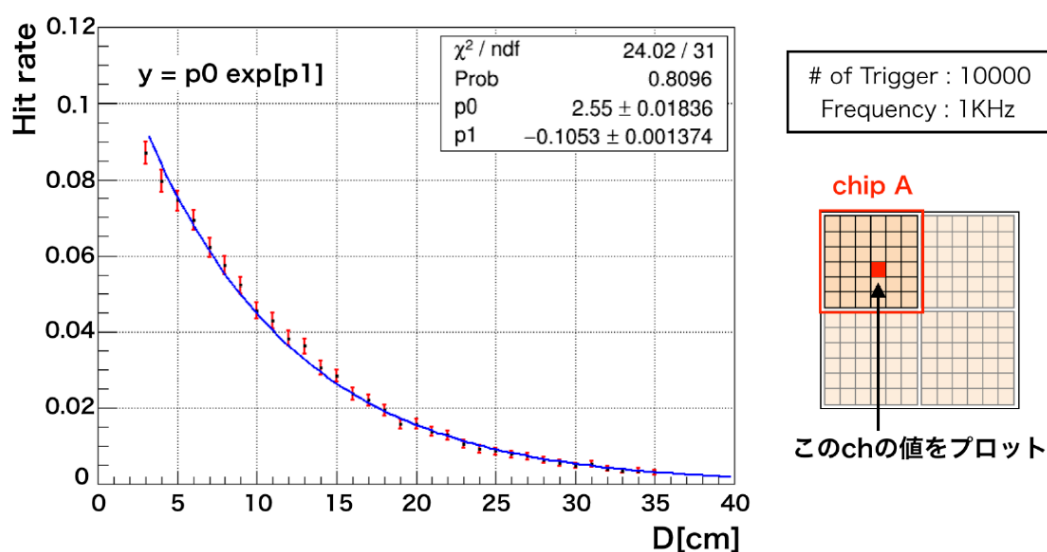


図 4.18: 光量の位置依存性測定結果。HAPD を 1cm ずつ移動し、位置ごとのヒット率をプロットした。[10, p.73]

4.2.3 長期安定性測定

ARICH モニターシステムは 1 日数十分の動作確認やキャリブレーションに使用される予定のため、モニター結果の再現性や安定性が求められる。先行研究により HAPD チャンネルの

1 光子信号ヒット率、HAPD の増幅率測定、ノイズレベル測定の長期安定性が確認された。これらの測定も ARICH 実機ではなく、暗箱内のセッティングを用いて行われた。

ヒット率の長期安定性

まずモニター光を入射した状態でのスレッシュホールドスキャンの結果を (図 4.19) に引用し、示す。左図は SA03 1chip の全 36 チャンネルでの結果で、横軸が HAPD チャンネル、縦軸が閾値電圧、Z 軸がヒット数である。赤破線で設定した閾値電圧を示している。ch27 はオフセット調節が正常に行えていない不良チャンネルである。右図は ch1 のみの結果を表し、横軸が閾値電圧、縦軸がヒット数である。1 光子信号の壇が確認できる。

1 光子相当信号のイベントを測定するため、スレッシュホールドスキャンの結果から閾値電圧は 0.22mV としてヒット率の測定を行った。測定結果を (図 4.20) に引用し、示す。左図は 1 時間ごとのヒット率の時間変化、右図は長期測定におけるヒット率分布である。ここでヒット率は「(1 光子相当信号以上の電圧のイベント数)/(全トリガー数)」とする。471 時間の長期測定でヒット率が安定していることが確認できる。

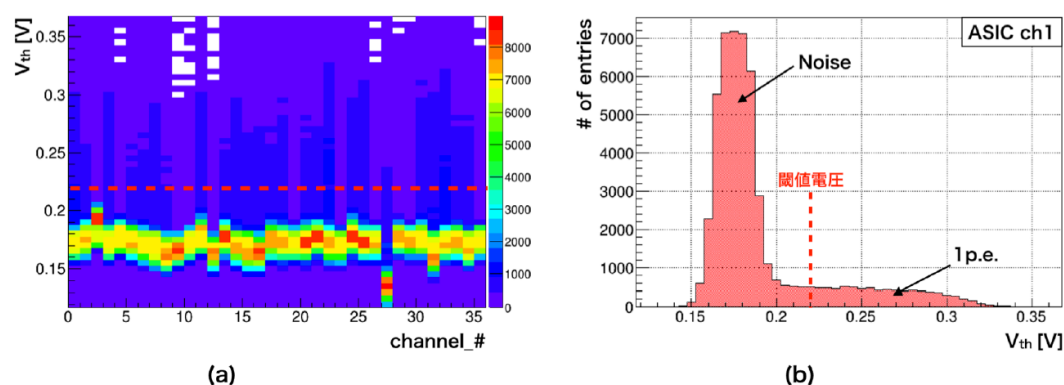


図 4.19: スレッシュホールドスキャンの結果。(a) SA03 1chip の全 36 チャンネルでの結果。赤破線で設定した閾値電圧を示す。ch27 はオフセット調節が正常に行えていない不良チャンネル。(b)ch 1 のみの結果を表す。1 光子信号の壇が確認できる。[10, p.76]

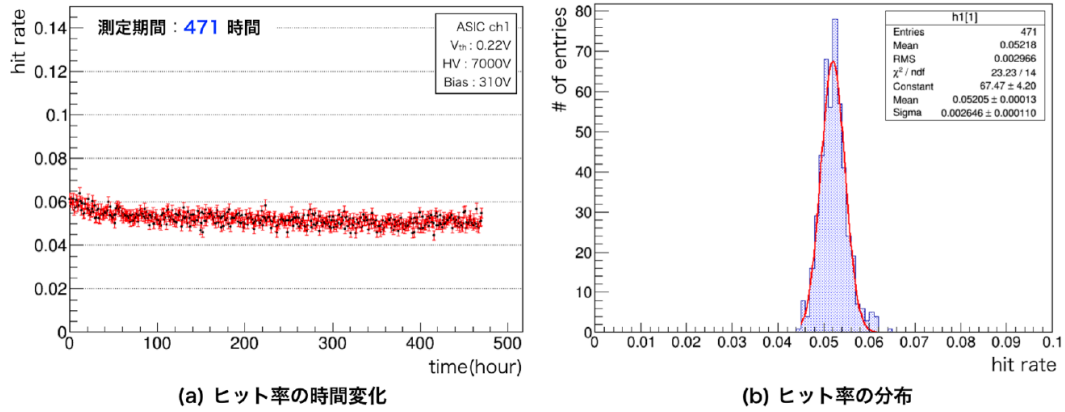


図 4.20: ヒット率の時間変化。(a)1 時間ごとのヒット率の時間変化。(b) 長期測定におけるヒット率分布。[10, p.77]

増幅率測定の長期安定性

まず、スレッシュホールドスキンの結果から HAPD の増幅率 G を算出する方法を述べる。スレッシュホールドスキンの結果をヒストグラムにし、フィッティングを行った例を (図 4.21) に示す。横軸は閾値電圧 (V_{th})[V]、縦軸はエントリー数である。閾値電圧の低い部分にある大きなピークがノイズ、次の壇上のなだらかな部分が 1 光子信号にあたる。ノイズのピークを Gauss 関数でフィッティングした時の中心値を μ_0 、1 光子信号の傾斜部を相補誤差関数でフィッティングした時の中心地を μ_1 とする。1 光子信号の波高値 ΔV は $\Delta V = \mu_0 - \mu_1$ で求められる。SA03 による増幅率を $G_{(Amp)}[mV/fC]$ とし、HAPD による増幅率 G は以下の式で求められる。

$$G[e^-] = \frac{\Delta V[mV]}{G_{Amp}[mV/fC]} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-4}[fC/e^-]} \quad (4.1)$$

この式を用いて増幅率測定の長期安定性を測定した。

その結果を (図 4.22) に引用し、示す。左図が 1 時間ごとの増幅率の時間変化、右図が長期測定における増幅率分布である。471 時間の長期測定で増幅率が安定していることがわかる。

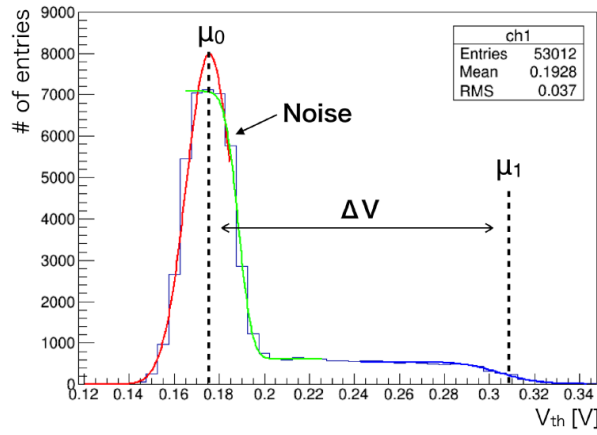


図 4.21: スレッシュホルドスキャンの結果と増幅率の算出方法 [10, p.78]

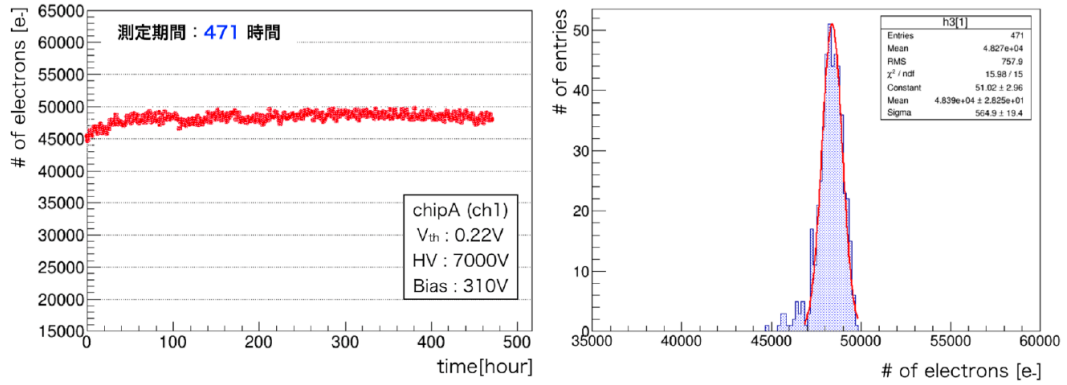


図 4.22: 増幅率の時間変化。(a)1 時間ごとの増幅率の時間変化。(b) 長期測定における増幅率分布。 [10, p.79]

ノイズレベル測定の長期安定性

まず、スレッシュホルドスキャンの結果からノイズレベルを測定する方法を述べる。(図 4.21) に示したノイズのピークを相補誤差関数でフィッティングし、その標準偏差 σ [mV] をノイズと定義すると、ノイズレベルは以下の式で求められる。

$$Noise[e^-] = \frac{\sigma[mV]}{G_{Amp}[mV/fC]} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-4}[fC/e^-]} \quad (4.2)$$

この式を用いてノイズレベル測定の長期安定性を測定した。

その結果を (図 4.23) に引用し、示す。左図が 1 時間ごとのノイズレベルの時間変化、右図が長期測定におけるノイズレベル分布である。471 時間の長期測定でノイズレベルが安定して

いることがわかる。

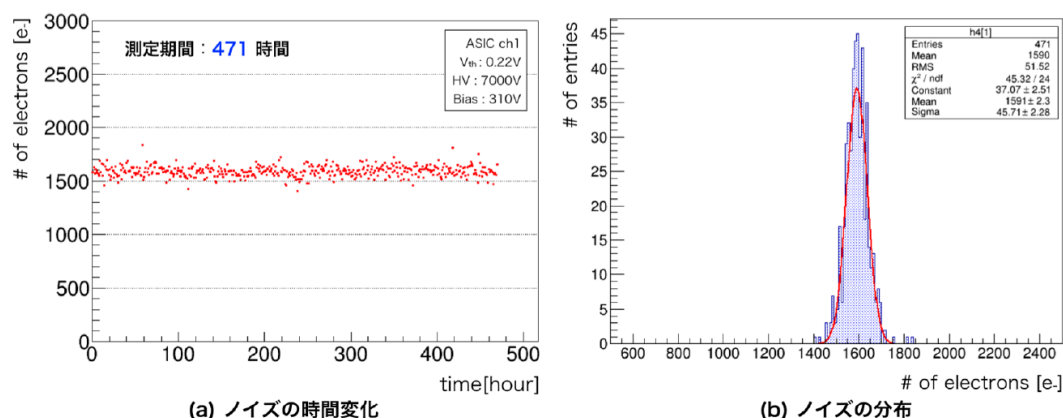


図 4.23: ノイズレベルの時間変化。(a)1 時間ごとのノイズレベルの時間変化。(b) 長期測定におけるノイズレベル分布。[10, p.82]

4.3 試験運用 (2016 年 8 月 2017 年 2 月)

2016 年 8 月から 2017 年 2 月まで、宇宙線を用いた ARICH の動作試験が行われた。これは ARICH 構造体に HAPD、読み出しシステムを少数インストールして宇宙線由来の光電子を検出する試験である。

同時にモニターシステムも実機に一部インストールし、試験運用を行った。この節ではこの試験によって得られた結果を先行研究による解析、考察を交えて簡単に述べる。

4.3.1 セットアップ

モニターシステムの試験運用は ARICH 構造体の 1 セクターを用いて行った。ARICH 構造体は HAPD 側とエアロゲル側の合体はしていないため、暗箱を用いて遮光をし、暗箱の内側で HAPD の光電面側にエアロゲルを置くことで暗箱内に導入したモニター光を散乱できるようにした。(図 4.24) にその様子を示す。暗箱のカバーはアルミニウム製であり、モニター光を反射してしまうためそれを抑える目的でエアロゲル周辺は黒紙で覆われている。

暗箱内で ARICH 構造体に HAPD は 17 本設置しており、その内 11 本が読み出し可能である。光ファイバーバンドルは 4 本のみを装着した (図 4.25)。図 4.25 の左図、赤円部分に装着した光ファイバーバンドルの先端が見える。図 4.25 の右図は設置されたエアロゲル、HAPD、光ファイバーの配置であり、薄青色の四角がエアロゲル、橙色の四角が読み出し可能 HAPD、薄橙色の四角が読み出し不可能 HAPD、青点が光ファイバーバンドル先端の位置である。光

ファイバーバンドルは2セットを用いて、図 4.25 の 1,3,4 の位置に 1 セット、2 の位置にもう 1 セットを使用することで別々に発光させて試験を行えるようにした。

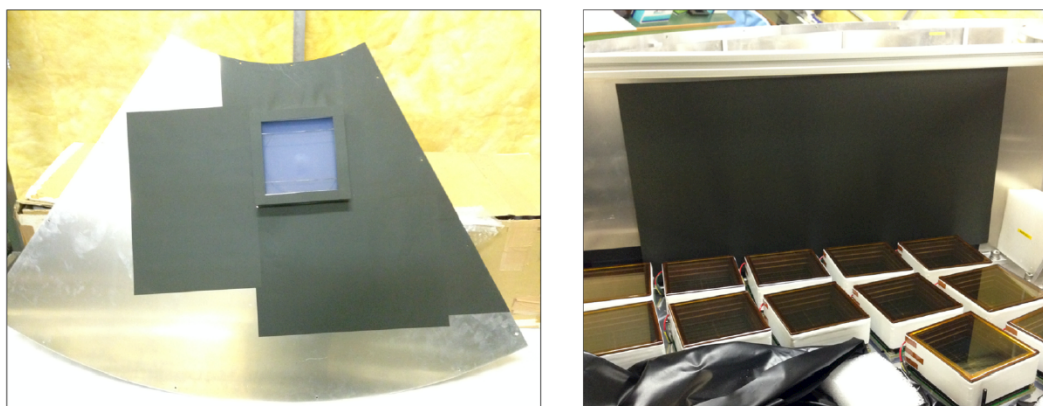


図 4.24: 試験用アルミニウムカバーとエアロゲル。[10, p.82]

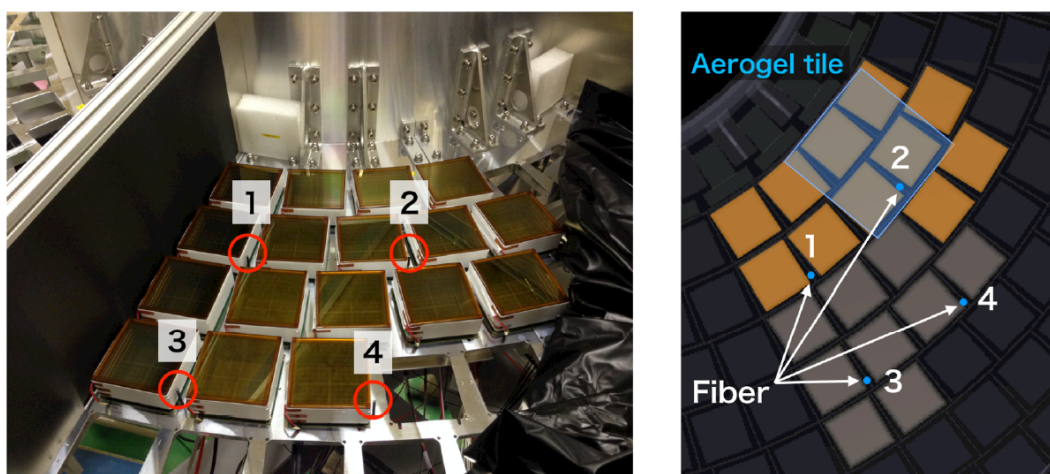


図 4.25: エアロゲル、HAPD、光ファイバーの配置図。[10, p.82]

LED 光源を点灯させるトリガーの生成や、データの取得のフローを図 4.26 に示す。Trigger Timing I/O(TT-IO) モジュールはトリガーを生成したり NIM 信号への変換を行ったりするモジュールである。TT-IO モジュールからの信号は Frontend Timing SWitch(FTSW) モジュール、COPPER、マージャーボードへと送られ、データ取得のトリガーとなる。また、同モジュールから NIM 信号をライトパルサーモジュールに送ることで、LED 光源点灯のトリガーとなり、データ取得と LED 光源点灯のタイミングを同期することができる。

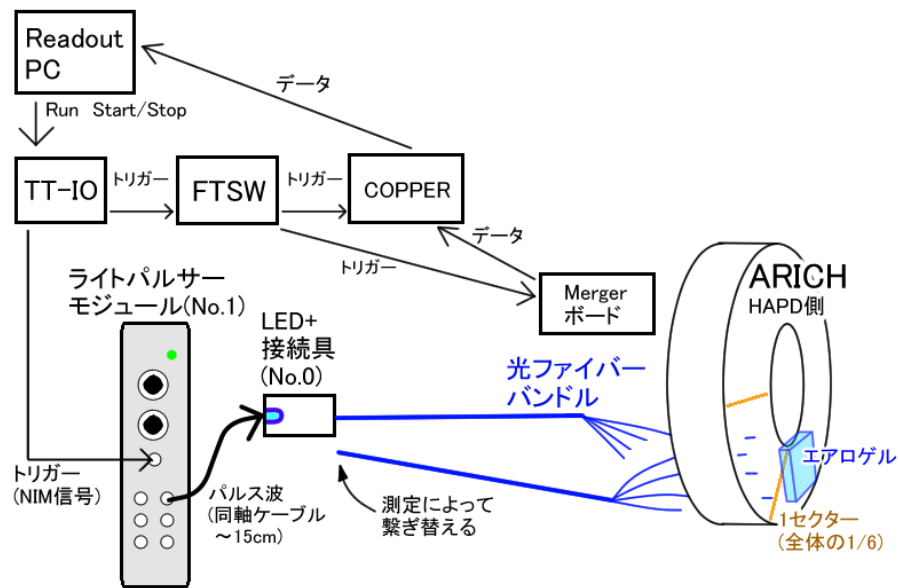


図 4.26:

4.3.2 LED 光源発光量とヒット率の相関

ライトパルサーモジュールの Amplitude ツマミを調節することにより、LED 光源へ出力するパルスの波高を大きくすることができる。Amplitude ツマミの目盛の値を変化させた時の HAPD のヒット率を測定した。閾値電圧は 1 光子相当信号を検出するために 60mV とした (5.4.1 小節で同様の操作を行っている)。

HAPD チャンネルと光ファイバーによる発光点からの距離 D (図 4.27 参照) とヒット率の相関を、8 通りの Amplitude で測定した結果を (図 4.28) に引用し、示す。Amplitude の目盛の値が大きいほどヒット率が高いことがわかる。

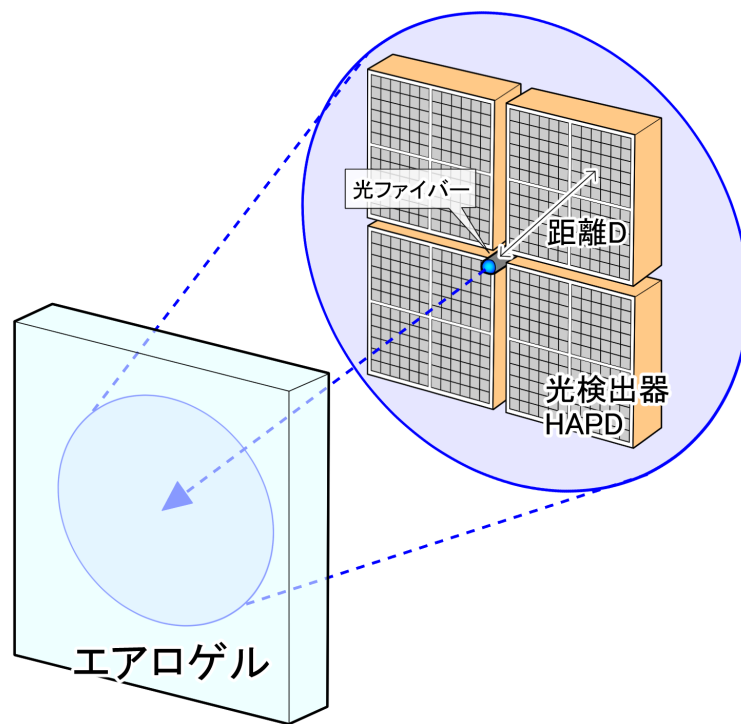


図 4.27: HAPD チャンネルと光ファイバーによる発光点からの距離 D を示す図。

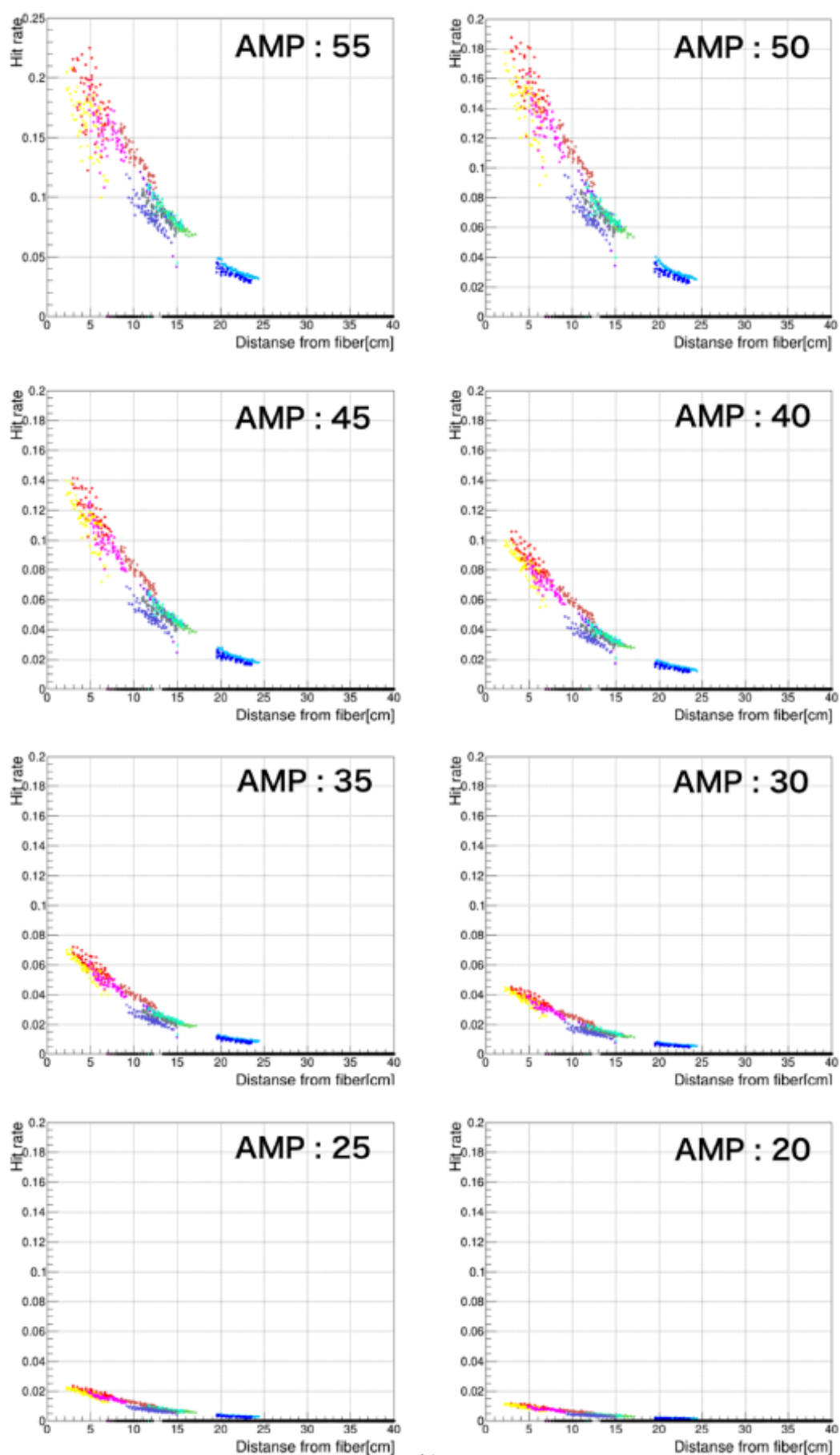


図 4.28: HAPD チャンネルと光ファイバーによる発光点からの距離 D と、ヒット率の相関図。
8通りの Amplitude で測定した。[10, p.91]

4.3.3 LED 光源点灯時間とヒット率の相関

ライトパルサーモジュールの Width ツマミを調節することにより、1 パルスあたりの LED 光源の点灯時間幅を変化させることができる。モニターシステムに適する点灯時間を調べるため、これを変化させたデータの取得を行った。

まず、Width を変化させた際の HAPD チャンネルのヒット率の変化を (図 4.29) に示す。縦軸の hitrate は、光ファイバーによる発光点からの距離 D(図 4.27 参照) が近い (5cm 以内) チャンネルのヒット率のヒストグラムを作り、ガウス分布でフィッティングした時の mean 値を表す。誤差棒はフィッティング結果の mean 値の誤差を表す。

Width 値が 550 以上程度であれば HAPD チャンネルのヒット率はほぼ変化しないことがわかる。

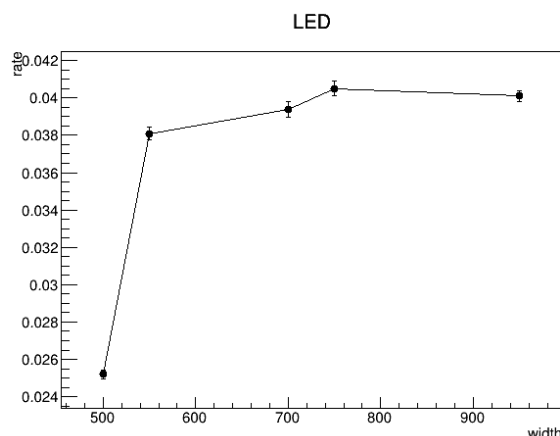


図 4.29: Width を変化させた際の HAPD チャンネルのヒット率の変化。

また、Width=550 のデータと Width=950 のデータの bitmap を (図 4.30) に示す。左が Width550 のデータ、右が Width950 のデータの結果である。これは 4bit 単位で読みだされたそのイベントが bit0~bit3 のどこにカウントされていたか、どの bit が 1 であったかをヒストグラムにしたものである。bit3 の方、つまり bitmap の右側の方が過去にあたる。なお、「4bit の内どれか一つが 1 である」ことをヒットイベントとする条件にしている。

(図 4.30) を見ると、多くは bit1 に 1 が入ってヒットし、bit2 目まで 1 が入っていることもあることがわかる。Width=950 のデータの方が bit1 まで 1 が入っている頻度が Width=550 と比べて増えていることがわかる。Width を大きくすることで LED 光源の発光時間が長くなっていることが確かめられたと言える。

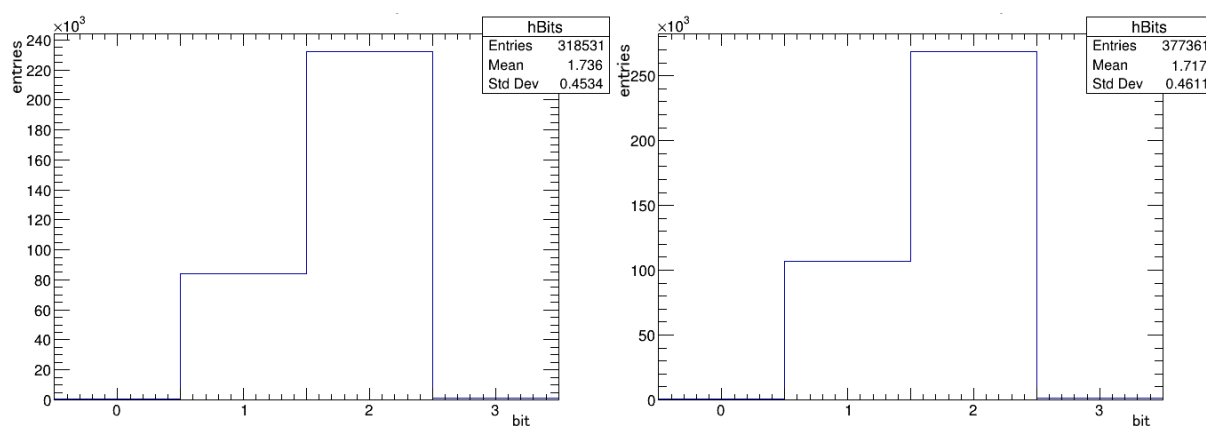


図 4.30: bitmap。左が Width550 のデータ、右が Width950 のデータの結果。

4.3.4 LED 光源点灯時間と光量距離減衰の相関

Width を変化させた際の、距離による光量の減衰の変化を調べた。HAPD チャンネルと光ファイバーによる発光点からの距離 D (図 4.27 参照) とヒット率の相関を、5 通りの Width で測定した結果を (図 4.31) に示す。この分布を指数関数分布 $y = A * \exp((x - x_0)/L)$ でフィッティングする。この時、 L が発光点からの距離によるヒット率の減衰の度合いを表す。Width と L の相関を表した結果を (図 4.32) に示す。誤差棒はフィッティングの誤差の値を表す。

この結果から、LED 光源の点灯時間の変化によって光量の距離減衰の度合いが変化しないことが分かった。

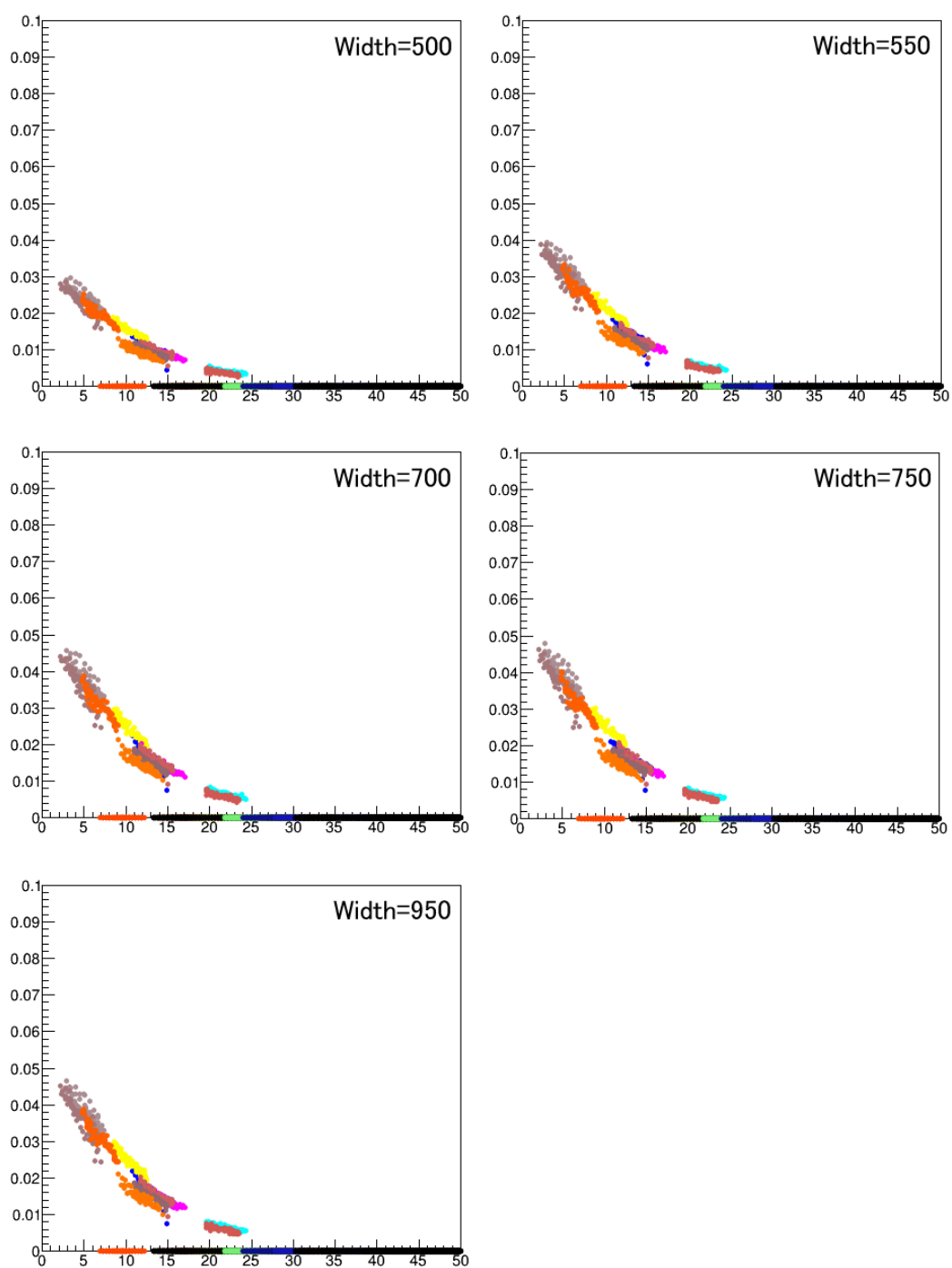


図 4.31: HAPD チャンネルと光ファイバーによる発光点からの距離 D と、ヒット率の相関図。
5 通りの Width で測定した。

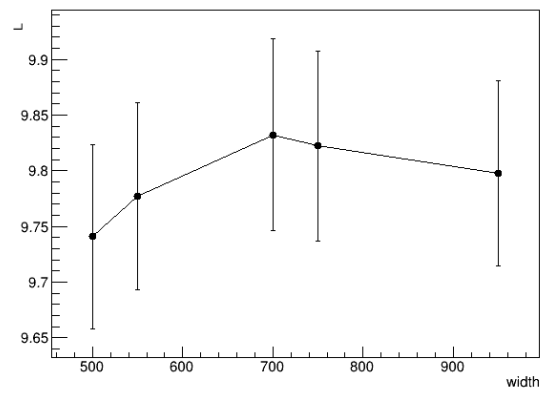


図 4.32: Width とヒット率の減衰の度合いの相関図。

第5章 ARICH モニターシステムの実装

先行研究により ARICH モニターシステムが HAPD の動作確認を行うのに十分な性能であることが示された。この章では ARICH モニターシステムを実際に ARICH 検出器に実装するにあたって構成要素の調節を行い、ARICH 検出器への実装とその後の動作試験について報告する。

5.1 実装される構成要素の評価

先行研究によりモニターシステムの各構成要素や HAPD を少数使用し、要求性能を十分満たすことが示された。本研究では ARICH モニターシステムを実装するにあたって、ARICH 検出器全体という大きいセッティングのために各構成要素を調節する必要がある。ARICH は全 6 セクターであり、1 セクターごとに LED 光源は 1 個使用するため、計 6 個が必要である。

モニターシステム実装に備えて、LED 光源とライトパルサーモジュールの性能の個体差を確認する必要がある。ライトパルサーモジュールは 1 台に出力が 6 チャンネルあり、6 個の LED に信号を出力することができるが、6 チャンネルの出力波形を個別に調節することはできない。ARICH 検出器内部に一様に光を行き渡らせる目的のため、LED の性能個体差が大きい場合はライトパルサーモジュールを複数台使用し、LED からの光量を同程度に調節する必要がある。

5.1.1 LED 光源の性能個体差

LED 光源の性能個体差、つまりライトパルサーモジュールが出力するパルス波高と、それに対する発光量の関係を測定した。

LED 個体差測定方法

測定セットアップの概要図を (図 5.1) に示す。ファンクションジェネレータからライトパルサーモジュールにトリガーを入力し、ライトパルサーモジュールから LED にパルスを出力する。LED は接続具に固定されており、LED とファイバー接続具 (図 4.9) はセットになっている。接続具に光ファイバーバンドルを接続し光を導入し、光ファイバーの先端を光電子増倍管の光電面に向けた。光電子増倍管の出力を ADC を用いて PC で測定した。個体差を測定する

にあたってセットアップの中で付け外しを行うのは LED と接続具のセットのみであり、ライトパルサーモジュール (No.4)、光ファイバーバンドルは全ての測定で同一の個体を使用した。

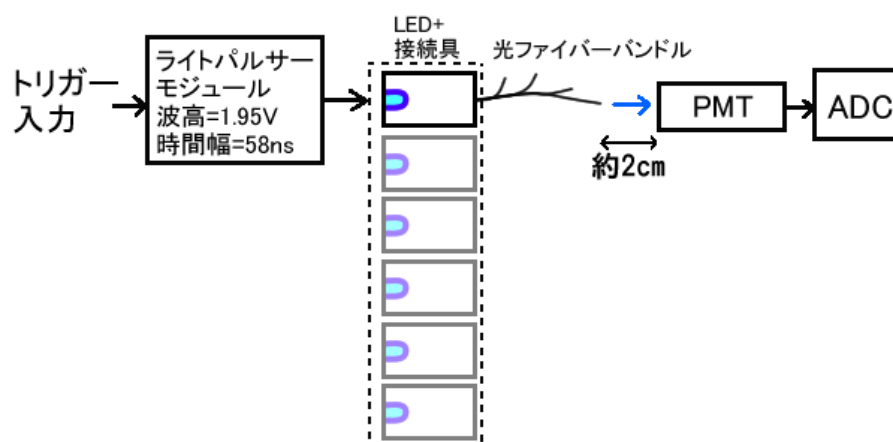


図 5.1: LED 性能個体差測定セットアップの概要図。

ファイバー接続具の円筒内で LED 光源が動くとき光ファイバー先端からの発光量が変わるため、接着剤 (セメダインスーパー X ハイパーワイド) を用いて LED 光源と接続具を接着した。



図 5.2: 接続具外部に出した LED の導線を延長し、LEMO レセプタクルコネクタに固定した様子。

LED 個体差測定結果、考察

LEDno.1 の測定結果を (図 5.3) に示す。横軸が ADCCH、縦軸が CH ごとのイベント数である。この ADCCH のヒストグラムを Gauss 分布でフィッティングした。

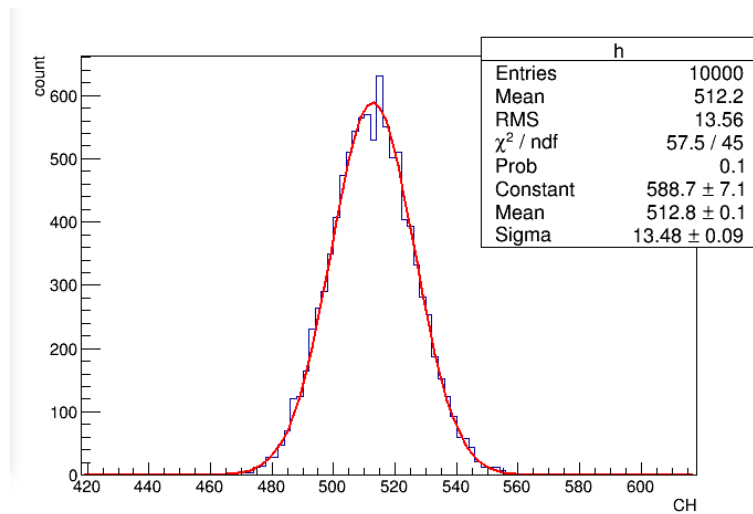


図 5.3: LEDno.1 の測定結果。横軸が ADC の CH、縦軸が CH ごとのイベント数。赤線は Gauss 分布でのフィッティング。

このフィットパラメータ μ 、 σ から以下の式を用いて検出光子数 N を求める。

$$N = 1.2(\mu/\sigma)^2 \quad (5.1)$$

ここで 1.2 は PMT の excess noise factor である。

次に、LEDno.1 を複数回測定し、検出光子数を求めた結果を (表 5.1) に示す。1～5 回目の測定および 6～10 回目の測定の間ではセッティングを極力固定したまま測定した。5 回目と 6 回目の間では一度接続具と光ファイバーバンドルを外し、角度を変えて接続し直した。この結果から、検出光子数は測定のたびに 10 %～20 %程度ぶれ、それは少なくとも接続する角度による変化より大きな寄与であることがわかる。先行研究で光ファイバーバンドルの各分岐ファイバーからの検出光子数が 10 %～20 %程度ぶれが確認されており、それは光源の光量のふらつきであると考察されていた。今回の測定でそれが裏付けできたと言える。

表 5.1: LEDno.1 を 10 回測定した結果。5 回目と 6 回目の間で接続の角度を変えて接続し直した。

測定回数 (回目)	(ADC ch)	σ (ADC ch)	光子数
1	451	13	1435
2	445	12.9	1415
3	493	12.9	1759
4	496	12.4	1890
5	493	12.5	1826
6	459	12	1737
7	459	12.1	1722
8	459	12.1	1709
9	460	12.1	1717
10	460	12.2	1700

次に、LED6 つの測定結果を (表 5.2) に示す。測定ごとで光子数に 10 %～20 %のぶれがあるため、各 10 回測定した平均値を示した。この結果から、殆どの LED 光源は光量に大きな差が無く、個体差よりも測定ごとのぶれの方が大きいことがわかる。

表 5.2: LED6 つの測定結果。光子数は各 10 回測定した平均値。

LEDno.	光子数
0	2727
1	1589
2	2523
3	2448
4	3151
5	2758

以上の測定の結果から、実験本番のセットアップは以下のように決定した。LEDno.0,2,3,5 は一台のライトパルサーモジュールから信号を入力する。これを基準とし、LEDno.1 は光子数が少ないため別のモジュールを用いて調整を行う。同様に LEDno.4 は光子数が多いためもう一台別のモジュールを用いて調整を行う。よって合計 3 台のライトパルサーモジュールが必要になる。

5.1.2 ライトパルサーモジュールの性能個体差

ライトパルサーモジュールは前述の通り、2つのツマミによって出力波高と時間幅を調節することができる。しかしその調節可能な幅や、ツマミの目盛の値に対する実際の出力波形にはモジュールによって個体差が存在する。前述の通り ARICH モニターシステムでは複数のライトパルサーモジュールを使用し、出力波形を調節する必要がある。そのため性能個体差を測定し、既に製作された個体だけで実装調節可能であることを確認した。なおライトパルサーモジュールは現在使用可能なものは No.0,1,2,4 の4台である。

ツマミの目盛の値と出力波高

まず、ツマミの目盛の値に対する実際の出力波形の関係を測定した。測定方法はツマミを調節し、出力波形をオシロスコープに表示し、目視で波形を読み取りプロットした。測定結果を(図 5.4)に示す。全てのモジュールが Amplitude の目盛の値に対しての出力波高は線形で、各モジュールで異なるのはオフセットである切片の値であることが確認できる。

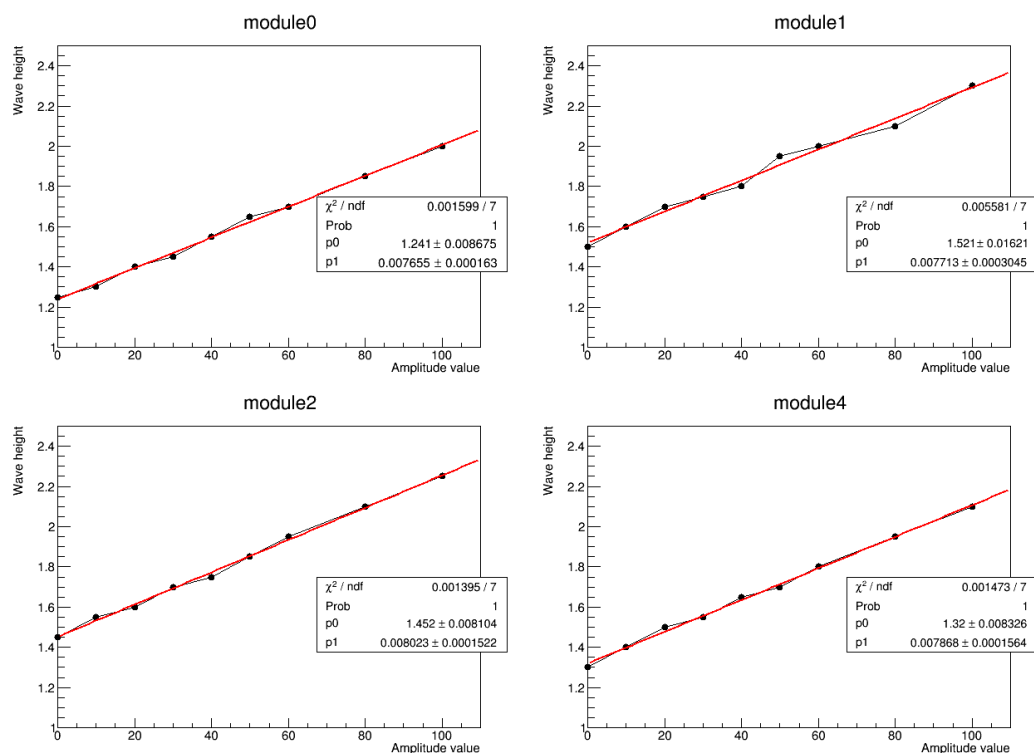


図 5.4: 横軸を Amplitude ツマミの目盛の値、縦軸を実際の出力波高でプロットしたグラフ。

出力波形と LED 光源の光量

次に、出力波形の波高と時間幅が同様であれば異なるライトパルサーモジュールであっても LED の光量に差が無いことを確認するため、オシロスコープを用いてモジュール No.1 と 4 の出力波形を同程度に調整し、(図 5.1) と同様のセットアップで光子数の測定を行った。波形調整時のオシロスコープの様子を (図 5.5) に示す。この時使用した LED は no.1 である。LED 個体差測定と同様、検出光子数を 10 回測定した平均値を結果として以下に示す。

- モジュール No.1 : 1742
- モジュール No.4 : 1760

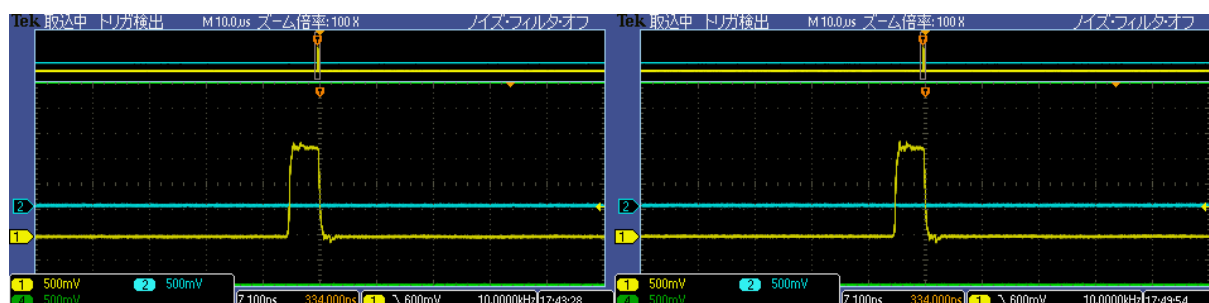


図 5.5: LED 光量測定セットアップの概要図。

この結果から、Amplitude ツマミと Width ツマミを調節して波高値と時間幅を揃えることによって、同程度の光量を得られることが確認できた。二つの測定の結果から、4 台のライトパルサーモジュールが実験本番で使用可能であることがわかった。LED 個体差測定の議論で前述の通りモジュールは 3 台使用するため、現存するモジュールで ARICH モニターシステムの実装が可能であると言える。1 台は予備とする予定であり、実験開始後に不具合があった際に交換することができる。

ツマミの目盛の値と LED 光源の光量

ARICH モニターシステムの実装に際し、光量の調整を行う必要がある。そのため、ツマミの目盛に対して光量がどの程度変化するかを測定した。(図 5.1) に近いセットアップで Amplitude ツマミの値を 10 ずつ大きくし、各値ごとに光子数の測定を行った。セットアップを (図 5.6) に示す。光ファイバーバンドルの代わりに延長用 40m ファイバーと延長用 1m ファイバーを使用している。

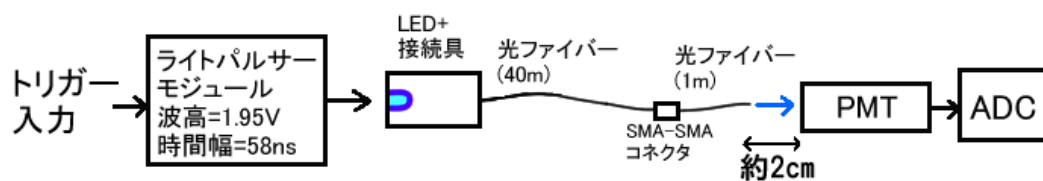


図 5.6: 波形調節の様子。左図がモジュール No.1、右図が No.4。ほぼ同じ波形に調節できていることがわかる。

測定結果を (図 5.7) に示す。

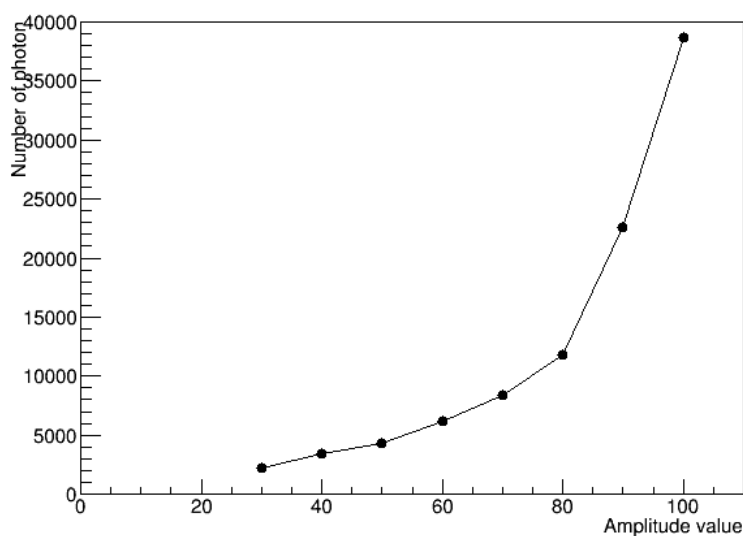


図 5.7: Amplitude ツマミの目盛の値 10 ごとに 3 回測定した検出光子数の平均値。

5.2 光ファイバーバンドルのインストール

2017 年夏に ARICH への全 HAPD・読み出し回路のインストールが完了し、HAPD 側とエアロゲル側のドッキング作業が行われた。その後、ARICH と ECL とのドッキングに向け、電源供給ケーブルのインストールが行われた。それと同時にモニターシステム用の光ファイバーバンドルのインストールを行った。この節では光ファイバーバンドルのインストールについて報告する。

分岐ファイバーの先端を ARICH の構造体に固定した様子を (図 5.8) に示す。モニターシステムの概要で述べた通り、読み出し回路側から HAPD の間を通し、エアロゲル側に向けて固定した。2 点でねじ止めすることによって固定しており、ぐらつきは無い。使用したネジの外

観を (図 5.9) に示す。Belle II 測定器内部は高磁場がかかるため、磁場の影響を受けない樹脂製を採用した。

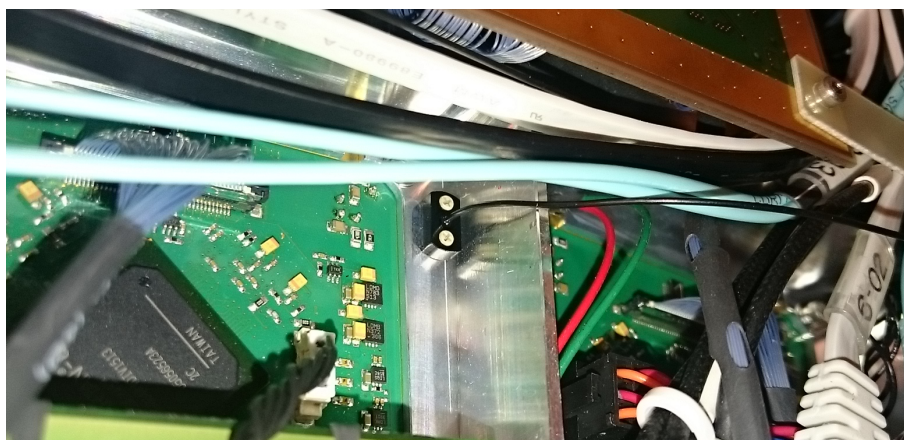


図 5.8: 分岐ファイバーの先端が ARICH の構造体に固定されている様子。2 点でねじ止めをしている。



図 5.9: 使用したネジの外観。Belle II 測定器内部は高磁場がかかるため、磁場の影響を受けない樹脂製を採用した。

分岐ファイバーは1セクターごとに15本インストールする。ファイバーバンドルは22本を1束にしたものであり、1セクターごとに1束使用するため、ファイバーバンドル1束につき7本の分岐ファイバーが予備となる。前述の通り分岐ファイバーの長さには差があるため、検出器内でできる限りファイバーの長さに余りが出ないように構造体入口から各設置箇所への経路と使用するブランチを決めた。

まず延長用光ファイバーの長さの関係から、1mの延長用ファイバーとファイバーバンドルの接続点はARICH検出器内に収納した。そして1mの延長用ファイバーを構造体へ導入する入口は他の配線との兼ね合いから決められた。構造体内のスペースは狭く、多数の配線で複雑

なため、単純な経路で設置箇所まで分岐ファイバーを通した。この際、Merger ボードを避けて通した。Merger ボードの下はファイバーを通すスペースが無く、Merger ボードの上はファイバーを支える方法が無いためである。構造体内には他の配線が多く通っており、この下を通すことでファイバーがたるまないよう支えることができる。予備となる分岐ファイバーとしてなるべく長いブランチを残せるように、各設置箇所までに足りる長さの分岐ファイバーを選んでインストールを行った。以上の条件から、実際にインストールする際に用いた経路と、各設置箇所に用いたブランチを (図 5.10) に示す。ただし、用いたブランチは実際にはセクターによって多少異なる。

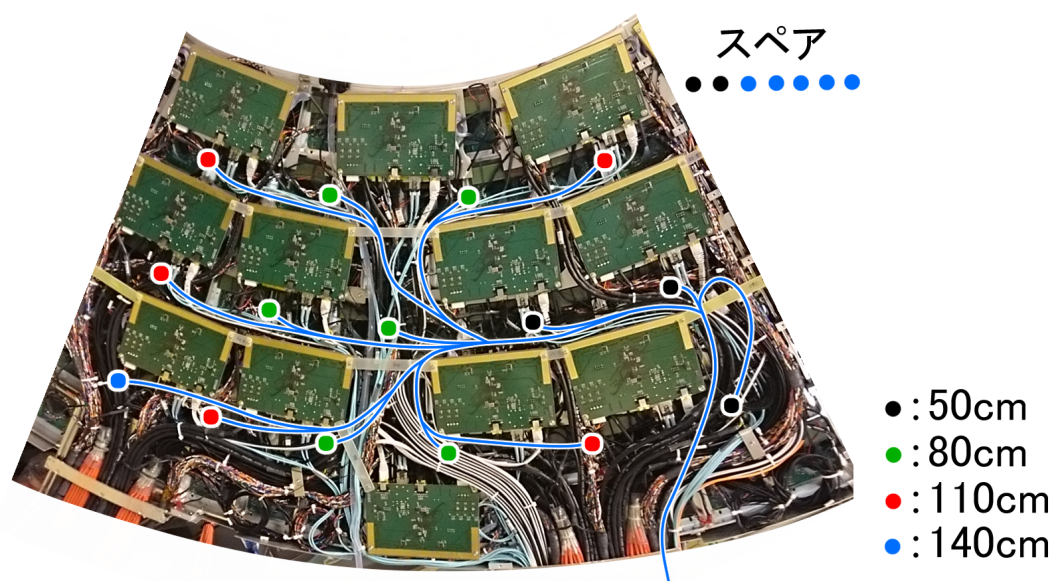


図 5.10: ファイバーバンドルのインストールに用いた経路と各設置箇所に用いたブランチ。

5.3 延長用光ファイバーのインストール

この節では延長用光ファイバー (1m、40m) のインストールについて報告する。

1m の延長用ファイバーはファイバーバンドルインストールと同時に行った。一端は検出器構造体内でファイバーバンドルと接続し、もう一端は 40m の延長用ファイバーと接続するため構造体外に伸ばした。ただしセクター 6 に限ってはインストールの際 1m ファイバーに不調があったため、2m のファイバーを用いている。5.13 小節で後述するがデータ取得の time-window は 500ns 以上のため、光路差による LED 光照射タイミングのずれはモニターシステムとして問題は生じない。

40m の延長用ファイバーは Belle II 測定器内部 (エンドキャップ部) から測定器外であるエレクトロニクストハット (E-hut) まで伸ばすため、コルゲートチューブを用いて結束・保護を行っ

た(図 5.11)。コルゲートチューブは 2 本用い、1 本につき 4 本の 40m ファイバーを束ねた。内訳はセクター 1,2,6 用+予備のチューブ、セクター 3,4,5 用+予備のチューブである。



図 5.11: 40m の延長用ファイバーをコルゲートチューブで結束・保護した様子。

5.4 実装後試験のセットアップ

光ファイバーバンドルインストール後に ARICH 単独でのモニターシステム動作試験を行った。

試験セットアップの概要図を(図 5.12)に示す。トリガー、データのフローは 4.3.1 小節で述べた、2016 年 8 月から 2017 年 2 月まで行われた動作試験と同様である。

また、試験時の ARICH の様子を(図 5.13)に示す。左図のように暗幕で遮光した状態で試験を行った。右図は暗幕を取り除いた様子である。Belle II 実験本番では他検出器とドッキングするため暗幕は必要無いが、今回の試験では ARICH 単体のため必要である。今回の試験での ARICH は読み出し基板が剥き出しであり、暗幕での遮光は不十分であり、HAPD が光漏れを検出することが予想される。今回の試験ではセクター 3 を使用して試験を行った。また、COPPER は 1 セクター分を同時に動かすことができないため、COPPER を繋ぎ替えて複数回に分けてデータの取得を行った。

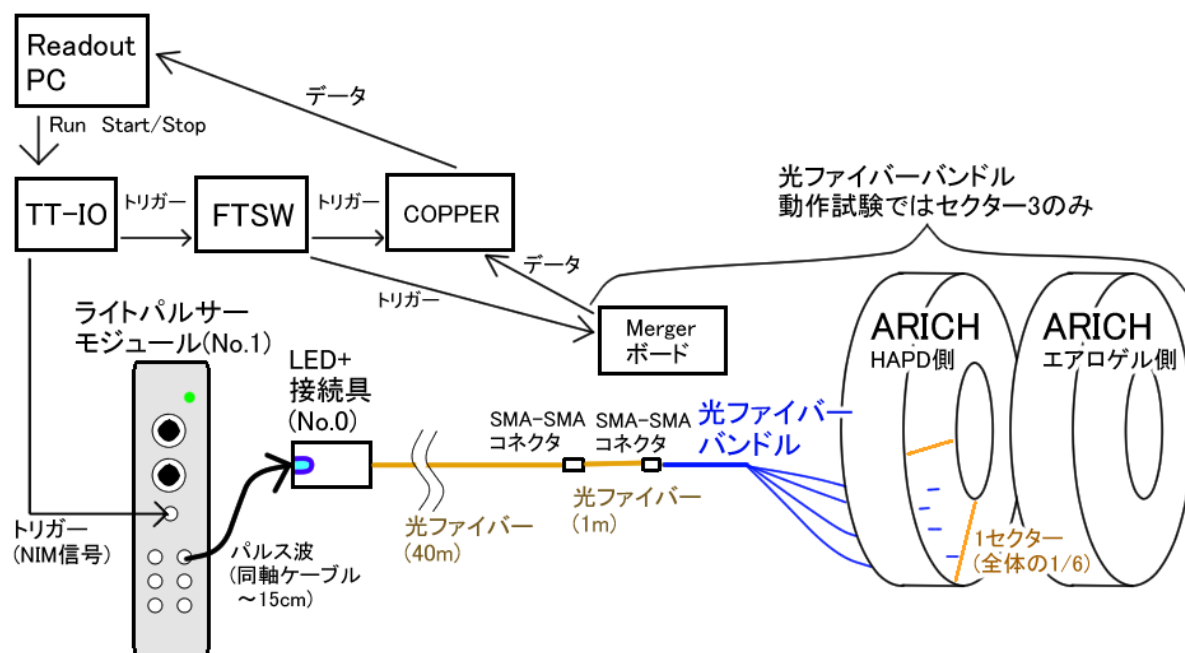


図 5.12: ARICH 単独でのモニターシステム動作試験のセットアップ概要図。

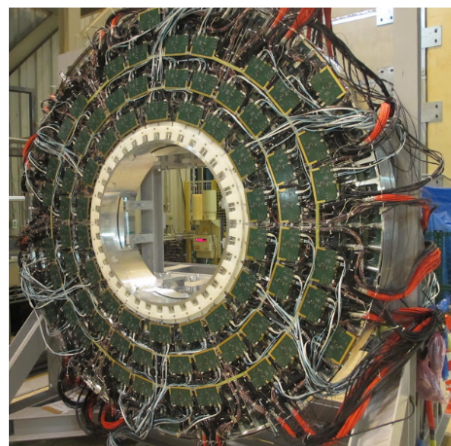


図 5.13: ARICH 単独でのモニターシステム動作試験時の ARICH の様子。左図の状態で試験を行った。右図は暗幕を取り除いた様子。

5.4.1 閾値電圧値の決定

モニターシステムの動作試験を行うためには、HAPD からの 1 光子相当信号を読み出すために適する閾値電圧を決定する必要がある。そのため本試験では最初に LED 光源を点灯せずにスレッシュホールドスキャンを行った。スレッシュホールドスキャンの結果の例を (図 5.14) に示す。左図は HAPD1 チャンネルの結果。右図は HAPD6 本分 (840 チャンネル) の結果を二次元ヒストグラムにしたものである。

SA03 のオフセット電圧値は 60mV に設定しているため、60mV の位置にノイズのピークが見られる。また、光漏れが原因と考えられる 1 光子相当信号の段が 90mV から 150mV の範囲に見られる。以上の結果から、閾値電圧を 110mV に設定してデータを取得することを決定した。

なお右図で見られる縞模様は HAPD に HV をかけた際に発生し、HAPD 単位で全チャンネルがヒットしていると考えられるが、原因は調査中である。

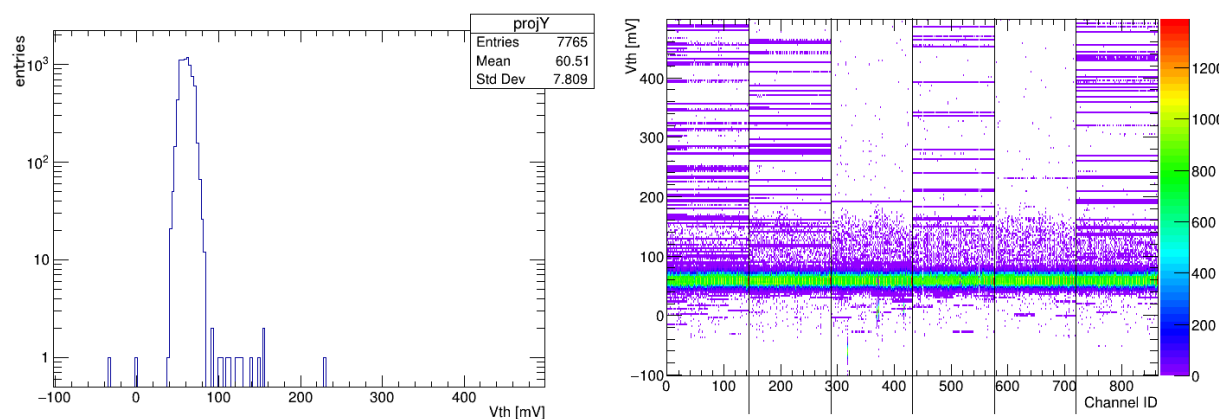


図 5.14: スレッシュホールドスキャンの結果。左図は HAPD1 チャンネルの結果。右図は HAPD6 本分 (840 チャンネル) の結果を二次元ヒストグラムにしたもの。

5.4.2 データ取得タイミングの調整

今回のセットアップでは 2016 年 8 月から 2017 年 2 月まで行われた試験運用時 (4.3 節参照) のセットアップと比べて、40m の延長用ファイバーが挿入されている。この分、データを取得するトリガーに対して LED 光源点灯のタイミングが有意に遅くなる。そのため、データ取得のタイミングの調整を行った。

この調整は FPGA のパラメータである `trgdelay` を変更することで行う。必要であれば `hdcycle` も変更する。3 章の 3.3.3 小節で論じた通り、`trgdelay` によるデータ取得の遅延時間は (クロック周期) × (hdcycle) × (trgdelay) で求めることができる。今回のセットアップではクロック周期は約 16ns である。

2017年2月まで行った ARICH の宇宙線試験の時のセットアップでは $hdcycle=8$ 、 $trgdelay=6$ であった。4章4.3.3小節の図4.30で示した通り、当時のセットアップでは4bitの内の中央でのカウントが多く、適切なタイミングでデータ取得が行っていた。この数値のままデータ取得した bitmap の結果を (図 5.15) の左に、 $trgdelay=7$ に変更してデータ取得した結果を同図の右に示す。

$hdcycle=8$ であるため、ヒストグラムの1 bin は $128ns$ にあたる。左図ではカウントされた bit がヒストグラムの左側に寄り過ぎている。これは LED の発光タイミングに対してデータ取得が少し早いことを意味している。宇宙線試験の時のセットアップと比べ、LED 発光タイミングは $200ns$ ほど遅くなっているため、この結果は予想されたものと言える。

$trgdelay$ を1増加させるとデータ取得が $128ns$ 遅れることになり、bitmap のヒストグラムで見ると全体がちょうど右に1 bin 分移動する結果になる。右図ではその通りに、左図と比べて全体が右に1 bin 分移動し、カウントされた bit がヒストグラムの中央にある。

以上でデータ取得タイミングの調整が正常に行うことができたと同時に、先行研究と比較して不具合なくモニターシステムの実装が進められたことが確かめられた。

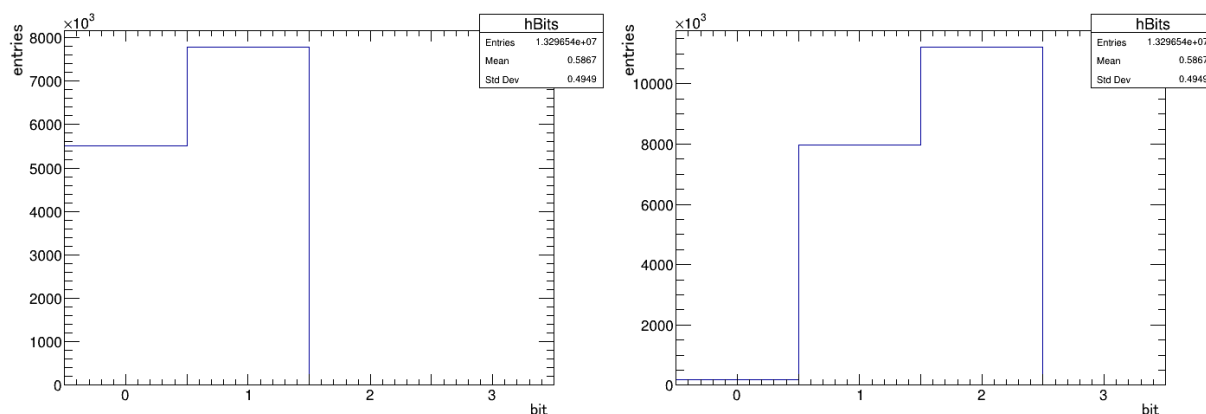


図 5.15: データ取得の bitmap。左が $trgdelay=6$ 、右が $trgdelay=7$ 。

5.4.3 LED 光源点灯時のスレッシュホルドスキンの結果

前述の通りデータ取得のタイミングが調整できたため、LED 光源を点灯させてスレッシュホルドスキンを行った。その結果を (図 5.16) に示す。左図は HAPD1 チャンネルの結果。右図は HAPD6 本分 (840 チャンネル) の結果を二次元ヒストグラムにしたものである。

SA03 のオフセット電圧値は $60mV$ に設定しているため、LED 光源非点灯時と同様、 $60mV$ の位置にノイズのピークが見られる。そして、LED 光源を点灯させたことで HAPD への光子の入射頻度が上がったことで1光子相当信号の段がよりはっきりと確認できる。また、2光子

相当信号の段も確認することができる。

なお、ライトパルサーモジュールの Amplitude 値は 100 に設定した。

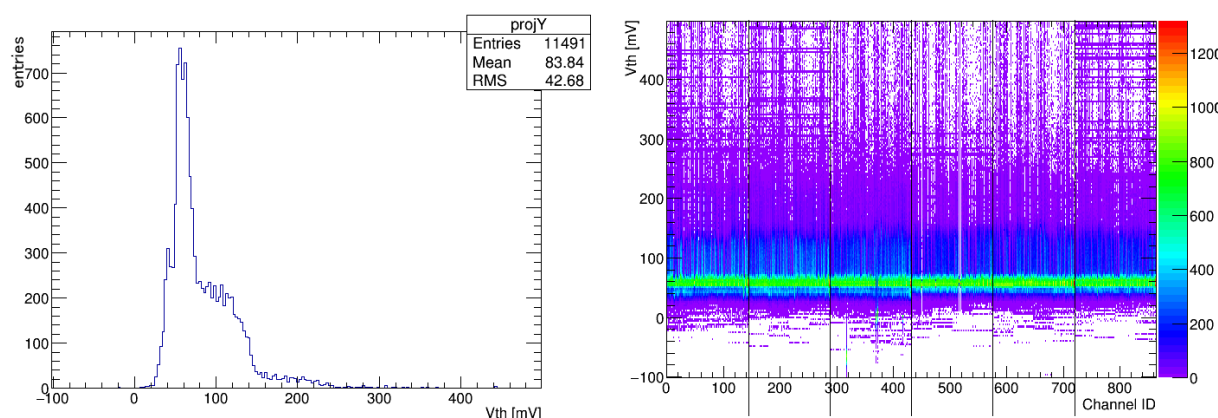


図 5.16: スレッシュホールドスキャンの結果。左図は HAPD1 チャンネルの結果。右図は HAPD6 本分 (840 チャンネル) の結果を二次元ヒストグラムにしたもの。

5.4.4 ヒット率分布

ARICH モニターシステムで求められるのは ARICH 検出器内に LED 光が行き届くことである。光ファイバーバンドルが ARICH 実機にインストールされ、本番用の延長光ファイバーと接続コネクタが揃ったため、今回のセッティングで検出器内に光が行き届いていればモニターシステムが実際に動作することが確かめられると言える。

前述のセットアップで、ライトパルサーモジュールの Amplitude を 100、Width を 580、閾値電圧とオフセット電圧の差を 50mV に設定し、データ取得を行った。このデータを基に、HAPD チャンネルごとのヒット数を実際の配置に従って表した 2 次元ヒストグラムを (図 5.17) に示す。左図が LED 点灯時、右図が LED 非点灯時。黒点は LED 光の照射位置を示す。

LED 点灯時と非点灯時共に 1 本の HAPD のデータが取得できていないが、これはオフセット調節に失敗し、この HAPD を除外してデータを取得したためである。また、前述の通り COPPER は 1 セクター分を同時に動かすことができないため、COPPER を繋ぎ替えて複数回に分けてデータの取得を行ったため、この図は複数のデータの結果を重ね合わせたものである。LED 非点灯時に 6 本の HAPD のデータが取得できていないが、これはマザーボード 1 枚のデータの読み出しが成功しづらく、ARICH の建設スケジュール上、今回の試験ではデータの取得ができなかったためである。

LED 点灯時と非点灯時で全チャンネルでヒット率が大きく異なることがわかる。また、今回のセッティングではセクター 3 のみ点灯させている。セクターの四隅のヒット率が低い部分

は実験本番では隣のセクターの光で補われるため、今回の結果は想定通りであり、LED 光を正しく検出できていると言える。

しかしセクター中央にも関わらずヒット率の低い HAPD や、逆にセクター端でヒット率の高い HAPD も確認できる。この原因は2つある。1つ目は、マージャーボードごとにオフセット設定値と実際のノイズの位置にずれが生じていることがあるため。2つ目は、HAPD によって増幅率が低い場合があるため。この2点が組み合わさることで1光子相当信号に対して適する閾値電圧ではない HAPD チャンネルが存在してしまった。

ARICH の実運用時にはモニターシステムを用いたスレッシュホールドスキャンを行い、その結果からノイズの位置や1光子相当信号に対して適する閾値電圧を算出し、設定する予定である。

以上から光ファイバーバンドルの実装は問題無く行われ、モニターシステムが ARICH 実機で想定通り運用可能であることが確かめられた。

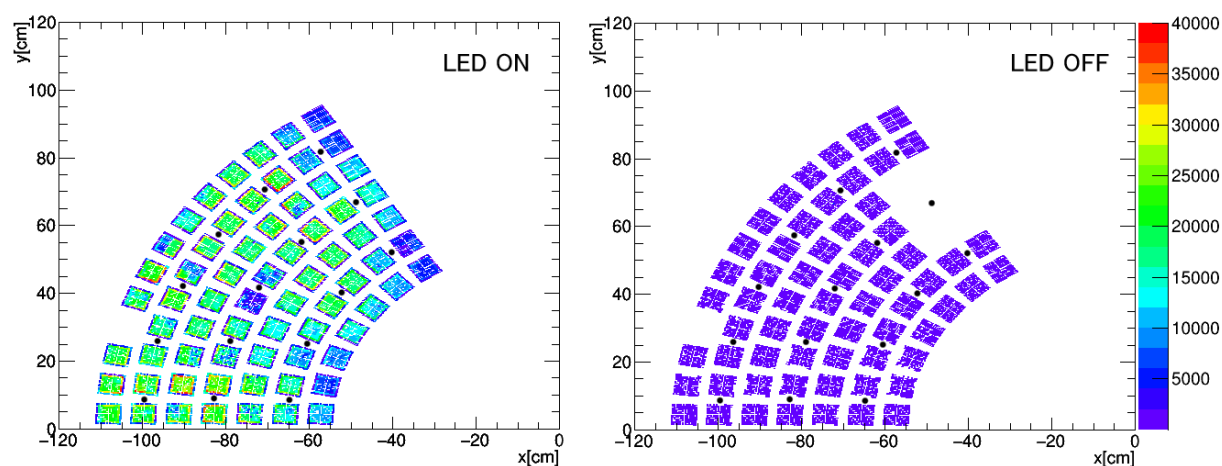


図 5.17: HAPD チャンネルごとのヒット数。左図が LED 点灯時、右図が LED 非点灯時。黒点は LED 光の照射位置を示す。

5.5 HAPD 増幅率の算出

ARICH モニターシステムの重要な機能として HAPD チャンネルごとの増幅率を算出することが求められる。今回の試験で取得したデータを解析することで増幅率が正しく算出可能であるかを確認する。

増幅率の算出は 4.2.2 で述べた通り、スレッシュホールドスキャンの結果のヒストグラムを Gauss 分布と相補誤差関数でフィッティングし、そのパラメータから行う。実際のフィッティングの結果の例を (図 5.18) に示す。

この結果から増幅率を算出する。この際、SA03 の増幅率である $G_{(Amp)}[mV/fC]$ を、0.0107V

と仮定して計算を行った (実際の SA03 の増幅率の分布を図 5.19 に示す)。マージャーボード 3 枚分 (=HAPD18 本分) の測定データを用いてチャンネルごとに増幅率を算出し、その分布を表すヒストグラムを (図 5.20) に示す。

増幅率 48000 付近に大きなピークが見られる。浜松ホトニクスで測定された HAPD の増幅率は今回のセットアップでの HV の値 7kV と Bias の値 300V では 40000 50000 程度であるため、HAPD の増幅率が正しく算出できていると言える。

増幅率 30000 付近にも小さいピークが見られる。これらのチャンネルは実際にスレッシュホルドスキャンの結果の 1 光子信号の波高が小さいことが確認できた。浜松ホトニクスの測定での HAPD の増幅率は 30000 程度のものも確認できるため、実際の増幅率がこのような分布であると考えられる。増幅率が 30000 程度のチャンネルでもノイズ以上・1 光子信号以下の位置に閾値電圧を設定することは可能であるため、ARICH の動作としては問題は無い。

また、増幅率 0 のチャンネルが多数見られる。HAPD は Belle II 測定器内の高磁場化での動作を想定しており、今回の試験では磁場が無いために HAPD 内の電場の歪みによって各 HAPD の最も外側の APD には光電子が入射しにくい。ヒット率が極端に低く 1 光子信号の段が見えないチャンネルは増幅率 0 として処理しているため、このような結果が得られることになる。

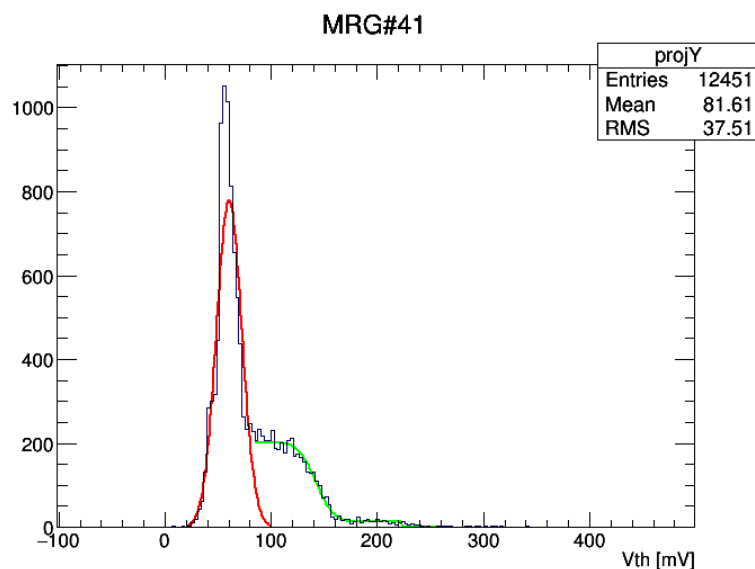


図 5.18: スレッシュホルドスキャンの結果のヒストグラムを Gauss 分布と相補誤差関数でフィッティングした例。

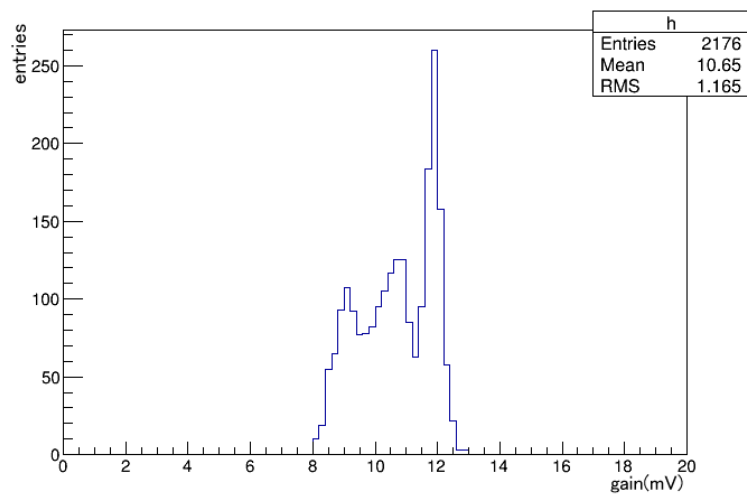


図 5.19: 量産型 SA03 の増幅率の分布。

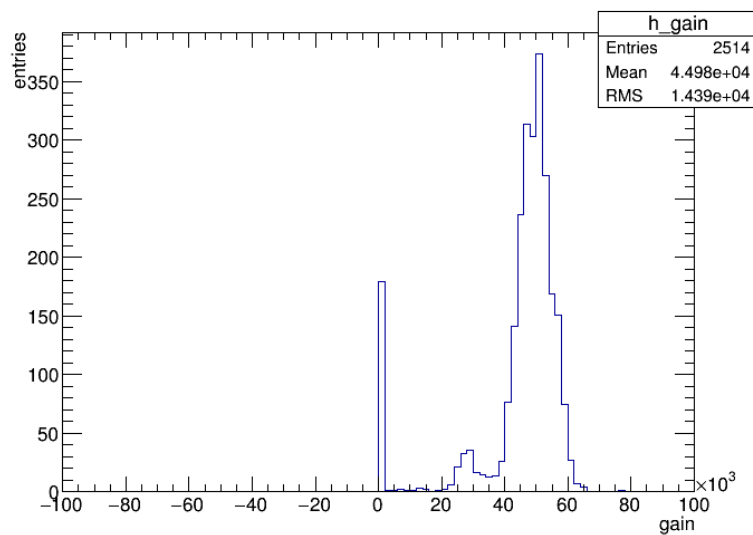


図 5.20: マージャーボード 3 枚分 (=HAPD18 本分) の測定データから算出した増幅率の分布を表すヒストグラム。

5.6 その他の構成要素の実装

ARICH は 2017 年 9 月に ECL との合体を行い、更にビームラインにある Belle II 測定器へのプッシュインを行った。ARICH モニターシステムでは各構成要素は以下のように実装した。

光ファイバーバンドル

ARICH の構造体の実装済みのため、ARICH と共に Belle II 測定器にインストールされた。

延長用光ファイバー (1m)

一端は ARICH の構造体内で光ファイバーバンドルと接続されているため、ARICH と共に Belle II 測定器にインストールされた。もう一端は ARICH 構造体外で 40m の延長用光ファイバーと接続した。

延長用光ファイバー (40m)

Belle II 測定器から、ビームライン外にある E-hut までを繋ぐように予備の 2 本を含めて設置した。

LED 光源

E-hut に設置された ARICH モニターシステム用の棚に固定した。

ライトパルサーモジュール

E-hut に設置された ARICH モニターシステム用の棚に NIM クレートと共に設置した。

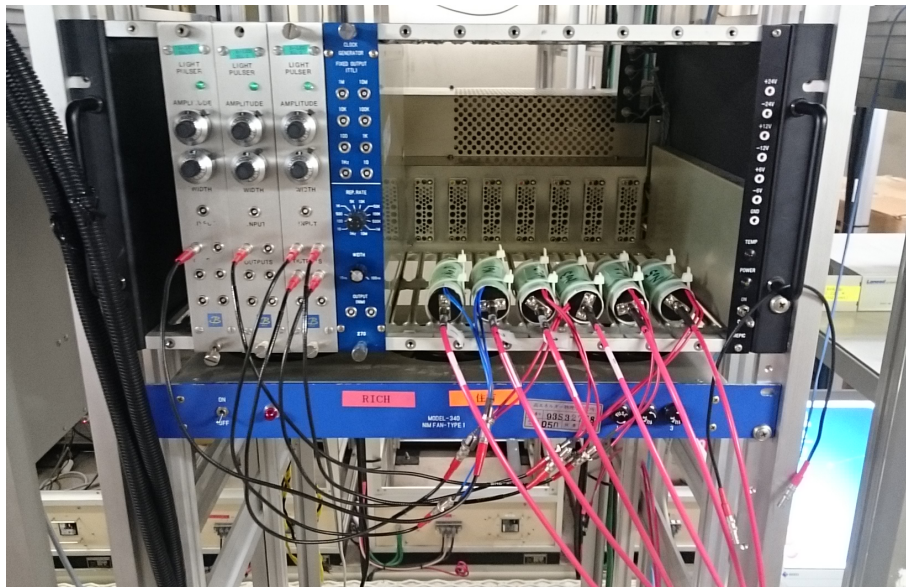


図 5.21: E-hut に設置された ARICH モニターシステム用の棚。ライトパルサーモジュール、LED 光源を設置した。光ファイバーは Belle II 測定器まで延びている。

第6章 Belle II実験と ARICH 検出器の現状

ARICH 検出器はエアロゲル、HAPD、読み出し回路の全インストールが完了し、2017 年 8 月にエアロゲルサイドと HAPD サイドの合体を行った。また、この状態で ARICH 単独での読み出し試験、電圧印加試験を行った。モニターシステムについては 5 章で述べた通り、光ファイバーバンドルの実装と LED 光照射試験を行った。

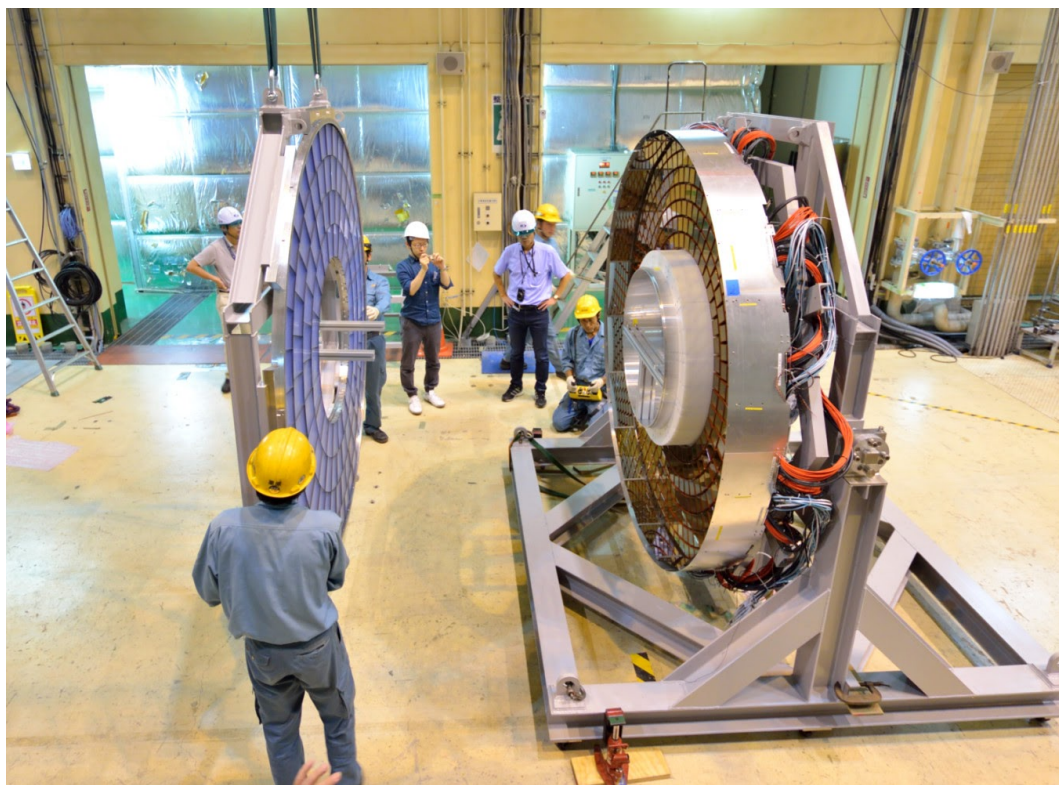


図 6.1: エアロゲル、HAPD の全インストールが完了し、両サイドの合体を行っている様子。

2017 年 9 月には ECL との合体を行い、更にビームラインにある Belle II 測定器へのプッシュインを行った。モニターシステムについては 5.6 節で述べた通り、各構成要素の実装を行った。

2018 年 2 月時点で、電源供給ケーブルの接続が完了し、電源供給モジュールも不具合のあった 1 台を除いて準備が完了した。

今後は Belle II 実験全体に対応した読み出しを可能にし、他検出器と合わせた宇宙線試験に備える。

Belle II 実験は 2018 年 2 月に Phase2 を開始し VXD 以外の試験を行い、2019 年には Phase3 として本格的に運転を開始する予定である。

第7章 結論

Belle II 実験は高エネルギー加速器研究機構で準備が進められている電子・陽電子非対称エネルギー衝突加速器実験である。開発中の Belle II 測定器は各役割を持つ複数の検出器から成り、エンドキャップ部では ARICH 検出器が荷電 K/π の粒子識別の役割を担う。ARICH では荷電粒子が輻射体を通過する際の Cherenkov 光を光検出器 HAPD を用いて二次元リングイメージとして検出する。HAPD の動作は ARICH の性能に影響するため、全チャンネルの動作確認を行うモニターシステムが必要不可欠である。ARICH モニターシステムでは LED からのパルス光を光ファイバーによって ARICH 内部に照射してシリカエアロゲルで反射させ、その光を HAPD が正常に検出することを確認することによって定期的に HAPD の動作確認を行う。

本研究では ARICH モニターシステムの各構成要素の性能測定、実装と動作試験を行った。LED 光源、ライトパルサーモジュールに関しては実装する全ての個体の光量の差を 10 % 程度に抑えることができることを確かめた。また、組み上げられた ARICH 実機にインストールしたモニターシステムから LED 光を照射した。その結果モニターシステムが正常に動作すること、および部分的ではあるがモニターシステムと連動して ARICH 検出器が正常に LED 光の信号を検出できていることを確認した。さらに動作試験で取得したデータを用いて実際に HAPD 複数台の増幅率を算出し、モニターシステムの目的である HAPD の動作確認が可能であることを確かめた。

今後は全セクターでの照射試験を行う予定である。また、スレッシュホールドスキャンの結果を用いた HAPD チャンネルの評価、設定の自動化を進める。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援をいただきました。首都大学東京の住吉孝行教授、角野秀一准教授、汲田哲郎助教には高エネルギー実験の基本的な知識の教示をはじめ、学会発表資料の添削、本研究の助言まで大変お世話になりました。今野智之客員研究員には解析手法など実際の研究での手の動かし方の丁寧なご指導、研究の方針の助言をいただいたおかげで本研究を進めることができました。岩田修一客員研究員には私の学部時代には研究の基本的な事柄を教えていただいたほか、本研究でも論文を細かな点まで添削していただき、形にすることができました。米永匡伸さんには最も近い先輩として研究生活に関しての助言や、学生としての自発的な意識の持ち方を教わりました。様々な方の助けがあって本研究を成り立たせることができました。心から感謝致します。また、同期の市川星磨さん、佐々木慎之介さん、吉岡輝昭さんとの交流は研究に関する面以外でも楽しい学生生活を送る助けになりました。

高エネルギー加速器研究機構の ARICH グループの方々にも多大な支援をいただきました。特に西田昌平准教授には本研究の方針や学会発表資料の添削だけでなく、現場での研究のご指導やグループとしての研究の支援をしていただき、お世話になりました。

総研大の金道玄樹さん、東京理科大学の町田聖寛さん、新潟大学の小川和也さん、首都大学東京の柿本詩織さん、為近彩智さんには ARICH グループで共に研究する仲間として力をいただきました。Belle II Japan Student の方々には充実した学生生活の一貫として勉強会でお世話になりました。

最後になりますが本研究ならびに学生生活を支えていただいた両親に感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] T. Abe et al. [Belle Collaboration], "Belle II Technical Design Report" (2010)
- [2] S. Iwata "Development of the Aerogel RICH counter for a super B-factory experiment"
- [3] High Energy Accelerator Research Organization "Physics Achievements from the Belle Experiment" (2013)
- [4] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, Phys. Rev. Lett. 13, (1964) 138-140
- [5] M. Kobayashi and T. Maskawa, Progress of Theoretical Physics (1973), 49(2): 652-657
- [6] Physics Procedia 37 (2012) 1730-1735
- [7] arXiv:1201.4643v2 [hep-ex] 20 Dec 2012
- [8] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. 51, (1983) 1945-1947
- [9] 黒田 英諒 首都大学東京 修士論文 (2009)
- [10] 幡谷 航暉 首都大学東京 修士論文 (2016)
- [11] 吉田 圭佑 首都大学東京 修士論文 (2014)
- [12] 米永 匡伸 首都大学東京 修士論文 (2016)
- [13] <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-3-2-BelleIIDAQ.pdf>
- [14] <https://www.thorlabs.de/>
- [15] 浜松ホトニクス HAPD SpecSheet